



Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro¹

Thieres G. F. da Silva², Magna S. B. de Moura³, Sérgio Zolnier⁴, José M. Soares³,
Luciana S. B. de Souza⁴ & Elieth O. Brandão³

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi analisar as variações nas magnitudes e nas partições dos componentes do balanço de radiação e de energia, obtidos durante o período de crescimento da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB92579). O experimento foi conduzido em Juazeiro, BA, localizado na região do Semiárido brasileiro. Os fluxos de calor sensível (H) e calor latente (LE) no ar foram estimados por meio do balanço de energia, com base na razão de Bowen (BERB). Concomitantemente, o crescimento da cultura também foi monitorado. Em análise preliminar deste método, constatou-se que 62,7% dos dados coletados apresentaram consistência física para serem utilizados nas estimativas dos componentes H e LE. Observou-se que o valor médio da relação R_n/R_g foi igual a $59 \pm 5\%$, com os menores valores ocorrendo no início e final do ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, enquanto a magnitude dos valores do balanço de radiação de ondas longas (BOL) foi intensificada quando o índice de área foliar (IAF) era reduzido. Além disso, verificou-se também que o valor médio do albedo foi de $23 \pm 3\%$ e que 81% da energia disponível foram destinados ao fluxo de calor latente, enquanto os valores do fluxo de calor sensível no ar (H) e no solo (G) representaram 16 e 3%, respectivamente.

Palavras-chave: transferência de vapor d'água, fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível, razão de Bowen, evapotranspiração

Variation of the radiation and energy balance of the irrigated sugarcane in the semiarid Brazil

ABSTRACT

The objective of this work was to analyze the variations in the magnitudes and partition of the radiation and energy balance components, obtained during the growth period of the irrigated sugarcane (variety RB92579). The experiment was carried out in Juazeiro-BA, located in the Brazilian semiarid region. The sensible (H) and the latent (LE) heat fluxes in the air were estimated by means of the Bowen ratio energy balance (BREB). The crop growth was also monitored. In a preliminary analysis of this method, it was verified that 62.7% of the collected data presented physical consistence to be used for estimating the H and LE components. It was observed that the mean value of the R_n/R_g ratio was equal to $59 \pm 5\%$, with smaller values occurring at the beginning and at the end of sugarcane crop cycle, while the magnitude of long wave radiation balance (BOL) was intensified when the leaf area index (LAI) was reduced. Also, it was noticed that the mean value of the albedo was $23 \pm 3\%$ and that 81% of the available energy was destined to the latent heat flux, while the sensible heat in the air (H) and in the soil (G) represented 16 and 3%, respectively.

Key words: water vapor transfer, latent heat, sensible heat, Bowen ratio, irrigation, evapotranspiration

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor

² UAST/UFRPE, Fazenda Saco s/n, CP 063, Zona Rural, CEP 56900-000, Serra Talhada, PE. Fone: (87) 3831-1927. E-mail: thieres@uast.ufrpe.br

³ Embrapa CPATSA, BR 428, Km 152, Zona Rural, CP 23, CEP 56310-000, Petrolina, PE. Fone: (87) 3862-1711. E-mail: magna@cpatsa.embrapa.br; monteiro@cpatsa.embrapa.br; elieth.brandao@cpatsa.embrapa.br

⁴ DEA/UFV, Av. P. H. Hofls s/n, CEP 36570-000, Viçosa, MG. Fone: (31) 3899-1880. E-mail: zolnier@ufv.br; sanddrabastos@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Recentemente, visando diminuir a dependência do petróleo, reduzir a emissão dos gases do efeito estufa e mitigar os efeitos do aquecimento global, muitos países vêm sugerido modificações urgentes na matriz energética mundial, motivo pelo qual um forte esforço tem sido empregado na expansão de áreas de produção de cana-de-açúcar, inclusive sob diferentes sistemas de irrigação, na região semiárida do Brasil.

Nesta região, por meio da substituição da vegetação nativa os avanços das áreas agrícolas vêm promovendo modificações importantes no ecossistema de caatinga. Apesar disto, pouco se conhece sobre os processos que governam os balanços de radiação e de energia sobre o dossel da cana-de-açúcar, o que dificulta o entendimento de como as mudanças do uso da terra podem afetar o clima local (Baldocchi et al., 2000; Souza et al., 2010).

A compreensão dos processos que influenciam a interação biosfera *versus* atmosfera, pode ser obtida por meio de medições micrometeorológicas (Qin et al., 2008; Todd et al., 2000), a partir das quais é possível conhecer a fração destinada a aquecer o ar e o solo, bem como a utilizada no processo de transferência de vapor de água para a atmosfera (Asseng & Hsiao, 2000; Shen et al., 2004).

Esta partição de energia, também permite fornecer informações a respeito da evapotranspiração da cultura (ET_c) e, em seguida, por meio da relação da ET_c com a evapotranspiração de referência (ET_o), obter o coeficiente de cultura (K_c) a ser utilizado no manejo de irrigação (Kjaersgaard et al., 2008; Teixeira et al., 2007).

Para a partição da energia disponível ($R_n - G$) entre os fluxos de calor latente (LE) e de calor sensível (H), o método do balanço de energia, com base na razão de Bowen (BERB) se destaca como um dos mais utilizados, tendo como referência os gradientes de temperatura e vapor d'água acima da cultura. É uma técnica indireta quando comparada à dos vórtices turbulentos, que mede diretamente os fluxos, ou à lisimétrica, que quantifica a variação de massa de um volume de solo (Rana & Katerji, 2000).

O método BERB tem sido aplicado frequentemente em várias culturas, tais como: abacaxi (Souza et al., 2008), milho (Steduto & Hsiao, 1998), feijão caupi (Lima et al., 2005), videira (Teixeira et al., 2007), forrageira (Silva et al., 2005), bananeira (Teixeira, 2001) e café (Righi et al., 2007). Dentre as vantagens desta técnica se destacam sua simplicidade, baixo custo e o fato de apresentar bons resultados quando comparados aos métodos dos vórtices turbulentos e lisimétrico (Gavilán & Berengena, 2007; Silva et al., 2005; Todd et al., 2000), tal como desempenho superior ao método aerodinâmico (Molder et al., 1999). Contudo, o cálculo dos fluxos de H e de LE , por meio do método BERB, depende da determinação correta da razão de Bowen (β) que, por sua vez, é afetada pela precisão e exatidão das medições de temperatura e umidade do ar acima da cultura (Ohmura, 1982; Oliveira & Leitão, 2000; Perez et al., 1999).

Na Austrália, Inman-Bamber & Mcglinchey (2003) utilizaram o método BERB, visando estimar os valores de K_c para a cana-de-açúcar irrigada. Toledo Filho (2001) determinou as características aerodinâmicas da cana-de-açúcar e estimou sua

evapotranspiração por meio dos métodos BERB e de Penman Monteith para uma área comercial de cana-de-açúcar, em condições de sequeiro, situada no município de Pilar, AL. Cabral et al. (2003), adotaram o método de vórtices turbulentos para medir os fluxos de calor sensível, vapor d'água e de CO_2 ao longo do ciclo da cana-de-açúcar cultivada sob condições de sequeiro, no município de Sertãozinho, SP. Entretanto, poucos artigos científicos relatam a utilização de métodos micrometeorológicos em estudos realizados com a cultura da cana-de-açúcar irrigada, especialmente nas condições meteorológicas do semiárido brasileiro.

Com base no exposto se objetivou, com este trabalho, analisar a variação das magnitudes e partições dos componentes do balanço de radiação e de energia ao longo do ciclo fenológico da cana-de-açúcar irrigada, tipo cana-soca, cultivada no município de Juazeiro, BA, na região semiárida do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Área experimental

O experimento foi conduzido em um talhão comercial de cana-de-açúcar irrigada, situado na latitude $9^\circ 28' 07''$ S, longitude $40^\circ 22' 43''$ O e altitude de 386,5 m. A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* ssp., variedade RB92579) foi plantada em um solo da classe Vertissolo, constituído de material mineral, horizonte vértico, pequena variação textural ao longo do perfil, baixa velocidade de infiltração de água e com características de mudanças abruptas de expansão e contração, nos intervalos entre dois eventos consecutivos de irrigação (Amaral et al., 2007). A área experimental compreendeu 12,17 ha, com fileiras espaçadas 1,5 m e plantadas na direção leste-oeste. A adubação de manutenção foi realizada com base nas análises de solo e foliar, tendo sido aplicados $157,5 \text{ kg ha}^{-1}$ e $0,5 \text{ L ha}^{-1}$ de uréia e Ajipower, respectivamente. Para o controle de ervas daninhas foi aplicado, de maneira combinada, 1 L ha^{-1} de cada um dos herbicidas Aminol e Trop. A irrigação era do tipo superficial por sulcos, utilizando-se um sistema de condução em tubos janelados. Os eventos foram realizados quando o conteúdo de água no solo, obtido por meio de uma sonda FDR (Frequency Domain Reflectometer) modelo PR2/6 (Delta-T Devices Ltd., Burwell, Cambridge, UK), alcançava 50% da água disponível. Por outro lado, a lâmina de água era determinada com base nos valores de ET_o acumulados durante os intervalos entre duas irrigações consecutivas.

Medidas micrometeorológicas

Para obtenção dos dados micrometeorológicas, utilizou-se uma torre com oito metros de altura, posicionada a 350 m em relação à bordadura da área experimental. Para medição dos componentes do balanço de radiação e de energia, foram instalados vários sensores eletrônicos, especificado a seguir: a) Na altura $2z_{om} + 1,5h_c$ (onde, z_{om} - parâmetro de rugosidade da superfície para o *momentum* e h_c - altura do dossel da cultura) foram colocados um piranômetro, para medição da radiação solar refletida pela cultura, e um saldo radiômetro,

para medição dos componentes do balanço de radiação; b) No topo da torre foi instalado um piranômetro para medição da radiação solar incidente; e c) No solo, a 2 cm de profundidade, foram instalados três fluxímetros, situados entre fileiras e na fileira de cultivo.

Para a estimativa dos componentes do balanço de energia também foram utilizados três psicrômetros ventilados, cujos sensores eram constituídos de termopares do tipo T de cobre-constantan, sendo o primeiro localizado a uma altura de $2z_{om}$ em relação ao topo do dossel da cultura, enquanto o segundo e o terceiro, a uma distância de 1,5 m e de 3,0 m acima do primeiro psicrômetro, respectivamente. Essas distâncias entre os psicrômetros foram mantidas até o final do ciclo de cultivo da cana-de-açúcar porém, com o crescimento da cultura, os mesmos foram realocados para novas posições em relação ao dossel vegetativo. Os dados de precipitação pluvial foram coletados por meio de um pluviômetro de balsa instalada no topo da torre.

Todos os sensores foram conectados a um multiplexador (modelo AM16/32, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) e a um sistema de aquisição de dados (modelo CR10X, Campbell Scientific Inc., Logan, Utah, USA) programado para realizar as medições em intervalos de 60 s e armazenar as médias a cada 15 min. O monitoramento micrometeorológico compreendeu o período de 19/06/2007 a 09/06/2008, totalizando 357 dias.

Componentes do balanço de radiação

Foram medidos os seguintes componentes do balanço de radiação acima da superfície do dossel da cana-de-açúcar: a) Saldo de radiação, R_n ; b) Radiação solar incidente, R_g , e c) Radiação solar refletida, R_r . Os valores obtidos foram utilizados para o cálculo do balanço de ondas curtas ($BOC = R_g - R_r$) e de ondas longas ($BOL = R_n - R_g + R_r$). Finalmente, por meio da relação dos dados de R_g e R_r , foram calculados os valores da fração da radiação solar refletida pela superfície (cultura + solo), ou seja, o albedo (α , %).

Componentes do balanço de energia

A partição do balanço de energia à superfície, representada pelos fluxos de calor sensível e de calor latente, foi obtida por meio do método BERB, conforme as seguintes equações (Perez et al., 1999):

$$H = \frac{\beta(R_n - G)}{1 + \beta} \quad (1)$$

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

em que, β - razão de Bowen (adimensional).

Os valores de β foram calculados a partir da equação psicrométrica, apresentada a seguir (Righi et al., 2007):

$$\beta = \left(\frac{\Delta + \gamma (t_{bu1} - t_{bu2})}{\gamma (t_{bs1} - t_{bs2})} - 1 \right)^{-1} \quad (3)$$

em que: Δ - declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); γ - coeficiente psicrométrico ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$); t_{bu1} e t_{bu2} - temperaturas de bulbo molhado em dois níveis de medida acima do dossel da cultura ($^\circ C$); t_{bs1} e t_{bs2} - temperatura de bulbo seco em dois níveis de medida acima do dossel da cultura ($^\circ C$). Os valores de temperatura de bulbo seco e de bulbo molhado foram obtidos dos psicrômetros instalados em dois níveis (z_1 e z_2) acima do dossel da cultura.

Análise dos dados meteorológicos para aplicação do método BERB

Para avaliar os erros associados ao método BERB aplicado às estimativas dos valores β e, conseqüentemente, cálculo do fluxo LE, foram utilizados, inicialmente, os critérios definidos por Perez et al. (1999). De acordo com as recomendações desses autores, avaliaram-se a consistência física dos dados meteorológicos horários, com base nos dados do perfil de pressão de vapor d'água, resolução dos sensores e sinais dos gradientes de temperatura e de pressão de vapor d'água. Na convenção adotada no presente trabalho, os valores de R_n são considerados positivos quando em direção à superfície, enquanto os de G , LE e de H são positivos quando em direção oposta à superfície e aos gradientes de pressão de vapor (Δe) e de temperatura do ar (Δt), respectivamente. Obteve-se a variação de "t" e de "e" no perfil atmosférico pela diferença dos valores medidos em duas alturas (z_1 e z_2) acima do dossel da cultura ($\Delta t = t_{bs1} - t_{bs2}$ e $\Delta e = e_1 - e_2$) (Perez et al., 1999).

A partir das considerações acima, apenas duas combinações são válidas para estimativas fisicamente consistentes dos valores de LE e de H , sendo que, quando:

a) $(R_n - G) > 0$ e $\beta > -1$, o valor de LE (Eq. 2) sempre deverá ser positivo, enquanto H (Eq. 1) pode ser positivo (caso $\beta > 0$) ou negativo (caso $-1 < \beta$ menor ou igual a 0). Por outro lado, se $(R_n - G) > 0$ e $\beta < -1$, apenas os casos $LE < 0$ e $H > 0$ são possíveis;

b) $(R_n - G) < 0$ e $\beta < -1$, apenas os casos $LE > 0$ e $H < 0$ são possíveis. Em contraste, se $(R_n - G) < 0$ e $\beta > -1$, LE deverá ser sempre negativo, enquanto H pode ser negativo (caso $\beta > 0$) ou positivo (caso $-1 < \beta$ menor ou igual a 0).

Nas ocasiões em que as condições anteriores não são satisfeitas, o método BERB se torna inapropriado para a quantificação do fluxo LE e os seguintes erros, denominados por Perez et al. (1999), podem ser identificados: Tipo "A" se $(R_n - G) > 0$, $\Delta e > 0$, $\beta < -1 + |\epsilon|$, sendo ϵ o erro absoluto de β ; Tipo "B" quando $(R_n - G) > 0$, $\Delta e < 0$, $\beta > -1 - |\epsilon|$; Tipo "C" se $(R_n - G) < 0$, $\Delta e > 0$, $\beta > -1 - |\epsilon|$. Finalmente, o erro "D" ocorre quando $(R_n - G) < 0$, $\Delta e < 0$, $\beta < -1 + |\epsilon|$.

Adicionalmente, considerou-se que valores de $\beta < -0,75$, resultam em valores de LE e de H fisicamente inconsistentes (Ortega-Farias et al., 1996).

Estimativa dos fluxos diários de calor sensível e latente

Utilizaram-se, para o cálculo dos valores diários de LE e de H , os dados meteorológicos medidos a cada 15 min, quando os valores $(R_n - G)$ eram positivos. Contudo, utilizaram-se apenas os dias que apresentaram pelo menos 80% dos dados de LE e H fisicamente consistentes, de acordo com os critérios

mencionados anteriormente sendo, com isto, caracterizados como dias “válidos”. Para os dados rejeitados referentes aos 20% complementares do período diurno, foram feitas interpolações quando o primeiro valor de $R_n - G$ foi negativo, assumindo-se que os valores de LE e de H eram iguais a zero (Inman-Bamber & Mcglinchey, 2003; Ohmura, 1982).

Crescimento da cana-de-açúcar e nível de cobertura do solo

Para caracterizar o crescimento da cana-de-açúcar, realizou-se o monitoramento biométrico em intervalos de duas a quatro semanas, a partir dos 60 dias após o corte (DAC). Realizaram-se campanhas de medição obtendo-se, dentre as várias variáveis mencionadas por Silva (2009), a estatura média dos colmos (EMC, cm) e o índice de área foliar (IAF, $m^2 m^{-2}$), por meio de um integrador de área foliar (LAI 2000, LI-COR Inc., Lincoln, NE). Na quantificação do nível de cobertura do solo

(NCS, %) foram dispostos um sensor de radiação fotossinteticamente ativa linear, acima do dossel da cultura e outros três na superfície do solo, de maneira perpendicular e diagonalmente em relação às fileiras de cultivo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise dos dados meteorológicos para aplicação do método BERB

A partir dos critérios propostos por Perez et al. (1999) e se assumindo a rejeição dos valores da razão de Bowen (β) quando inferiores a $-0,75$, observou-se que 62,7% dos dados analisados foram considerados fisicamente consistentes (Tabela 1). No próprio estudo realizado por esses autores, valores consistentes foram constatados somente entre 56 e 70% do total de dados medidos em quatro localidades situadas em regiões semiáridas.

Analisando-se os dados de β , LE e de H para um dia específico de céu claro (23/06/2007), nota-se que a maioria dos valores inconsistentes ocorreu no período noturno, especialmente no horário entre 18 e 0 h (Figura 1A), quando se constatarem dados de β dentro da faixa de rejeição e inferiores a $-0,75$. Neste intervalo, os valores de H foram predominantemente maiores do que zero, enquanto os de LE foram negativos. Tal condição ($LE < 0$ e $H > 0$) se caracterizou como inconsistente, do ponto de vista físico, uma vez que, de acordo com os critérios propostos por Perez et al. (1999), quando $(R_n - G) < 0$ e $\beta < -1$, apenas os casos em que $LE > 0$ e $H < 0$ são possíveis. Por outro lado, entre 0 e 8 h verificou-se que alguns valores de β foram considerados consistentes ($\beta > 1$), resultando em valores de $LE < 0$ e de $H < 0$. Esses resultados mostram que ocorreram condições de atmosfera estável no período noturno, quando os valores dos gradientes de temperatura e de pressão de vapor se tornaram pequenos e se aproximaram da faixa de

resolução dos sensores utilizados, pelo qual tenderam a apresentar dados de β inconsistentes e, conseqüentemente, de LE e de H (Perez et al., 1999; Ohmura, 1982); entretanto se observa, para o período diurno, que a maioria dos valores de β apresentou consistência física, resultando em valores de $LE > 0$ e de $H > 0$, quando $\beta > 0$ (Figura 1B).

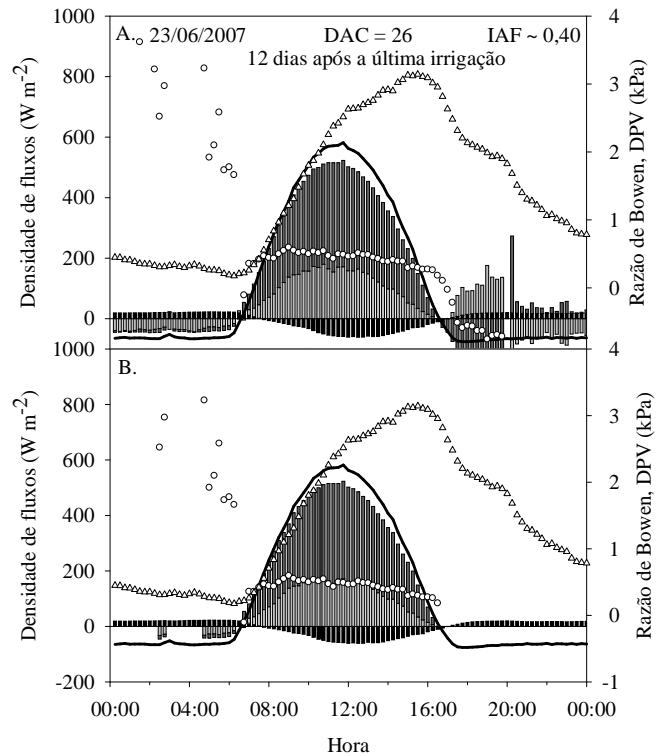


Figura 1. Componentes do balanço de energia para a cultura da cana-de-açúcar obtidos a partir do método BERB em 23/06/2007, correspondente a 26 dias após o corte (DAC) e 12 dias após a última irrigação. A Figura A considera todas as medições meteorológicas obtidas em condições de céu claro enquanto a Figura B se refere apenas aos dados que apresentaram consistência física para estimativa do fluxo LE

Verifica-se, na Tabela 1, que os erros de consistência física mais observados ao longo do ciclo da cana-de-açúcar foram do tipo “C”, oscilando em torno de 32,2%. Similarmente ao do tipo “C” que, também, ocorre durante o período em que $(R_n - G)$ é negativo, o erro do tipo “D” foi constatado em apenas 0,1% do total de valores inconsistentes. Por outro lado, os erros do tipo “A” e “B” que são observados quando $(R_n - G)$ era positivo, apresentaram menor importância uma vez que mostraram 0,2 e 4,9%, respectivamente. Em particular, o erro do tipo “A” ocorre especialmente após eventos de irrigação ou

Tabela 1. Classificação percentual da consistência física dos dados da razão de Bowen (β)

Período	PDC*	Tipo de Erro				$(-1 - \partial\epsilon) < \beta < (-1 + \partial\epsilon)$ *	$\beta < -0,75$ *	PDV**
		A*	B*	C*	D*			
Ciclo	62,7	0,2	4,9	32,2	0,1	12,9	0,4	88,0

* PDC = percentual de dados consistentes. Número total de dados medidos a cada 15 min: 34272. ** PDV = percentual de dias válidos. Número total de dias monitorados: 357. Erro "A": $(R_n - G) > 0, \Delta\epsilon > 0, \beta < -1 + |\epsilon|$; Erro "B": $(R_n - G) > 0, \Delta\epsilon < 0, \beta < -1 - |\epsilon|$; Erro "C": $(R_n - G) < 0, \Delta\epsilon > 0, \beta < -1 - |\epsilon|$; Erro "D": $(R_n - G) < 0, \Delta\epsilon < 0, \beta < -1 + |\epsilon|$

precipitação condicionando a obtenção de valores de $H < 0$. De acordo com Perez et al. (1999), para serem considerados consistentes os valores de H deveriam ter sido positivos quando os gradientes eram negativos.

Dos dados classificados inconsistentes, verificou-se que 12,9% foram devidos à ocorrência de valores de β dentro da faixa de rejeição. Por outro lado e se adotando valores de $\beta < -0,75$ inconsistentes (Ortega-Farias et al., 1996), os quais não são descartados pelos critérios de Perez et al. (1999), pode-se observar que somente 0,4% dos dados foram adicionalmente rejeitados ao longo do ciclo (Tabela 1).

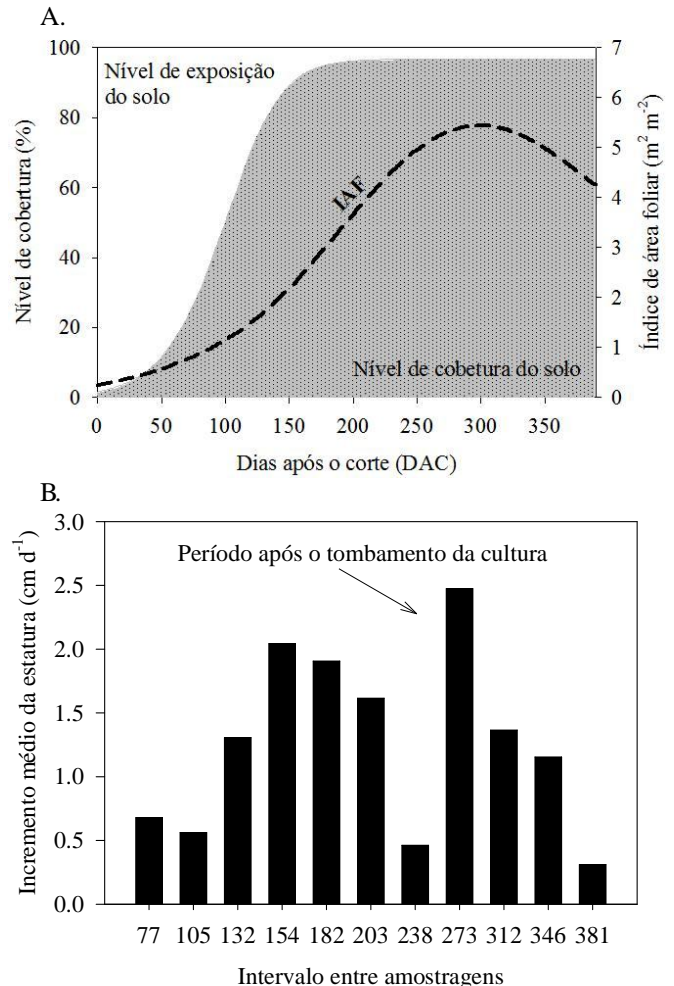
A partir da análise dos dados médios obtidos em intervalos de 15 min e se assumindo um dia válido como aquele em que pelo menos 80% dos dados referentes ao período diurno apresentaram consistência física, constatou-se que 88% dos 357 dias monitorados foram caracterizados como aceitáveis para serem utilizados na estimativa dos valores de LE e de H ao longo do ciclo de cultivo da cana-de-açúcar. Este procedimento foi realizado considerando-se que a inconsistência dos dados é constatada no período diurno, especialmente ao amanhecer e ao entardecer, quando então ocorrem as inversões térmicas. Além disso, deve-se salientar que, nesses períodos, os valores de LE se tornam tão insignificantes que suas estimativas não proporcionarão mudanças expressivas nos seus valores diários (Ohmura, 1982; Righi et al., 2007). Os 20% dos dados rejeitados para o período diurno foram substituídos por valores interpolados quando ocorre a transição da diferença ($R_n - G$) de negativa para positiva. Nesse instante se assume que ($R_n - G$) é representado apenas pelo fluxo de calor latente (LE) e que o fluxo de calor sensível no ar (H) é desprezível. Adotando-se este procedimento é possível observar que os dias considerados válidos, para participarem dos balanços de radiação e de energia, passaram de 80 para 88%, de modo que apenas 12% dos 357 dias monitorados foram rejeitados.

Peculiaridades do crescimento da cana-de-açúcar

Constata-se, na Figura 2A, que até 50 dias após o corte da cana-de-açúcar (DAC), o nível de cobertura do solo (NCS) era reduzido, como resultado do baixo índice de área foliar (IAF); em seguida, as plantas apresentaram crescimento acentuado, como pode ser observado na Figura 2B, na qual se destacam os valores médios do incremento da estatura dos colmos (IMEC); no período subsequente aos 50 DAC pode-se verificar que os valores de NCS aumentaram rapidamente, atingindo em torno de 80% aos 132 DAC.

Concomitantemente, o valor do IMEC era da ordem de $1,30 \pm 0,06 \text{ cm d}^{-1}$, mas aumentou para $2,0 \pm 0,14 \text{ cm d}^{-1}$ aos 154 DAC. Observou-se, porém, nos dias seguintes, uma redução contínua dos valores de IMEC em decorrência do tombamento das plantas aos 238 DAC, quando então seus valores médios se tornaram inferiores a $0,5 \text{ cm d}^{-1}$. Apesar disto, o valor de NCS ainda se mostrava elevado, oscilando em torno de 99%. No período subsequente ao tombamento da cana-de-açúcar, o valor do IMEC tendeu a aumentar novamente, caracterizando-se como uma nova fase de crescimento da planta (Figura 2B), quando então o valor de IEMC oscilou em torno dos $2,5 \pm 0,81 \text{ cm d}^{-1}$ aos 237 DAC. Ao final do ciclo da

cultura os valores de IMEC tenderam a decrescer novamente, tornando-se inferiores a $0,5 \text{ cm d}^{-1}$. O IAF atingiu valores máximos próximos aos 300 DAC, alcançando $5,5 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Figura 2A), sendo que, em seguida, passou a decrescer gradativamente, até o final do ciclo; apesar disto, permaneceram inalterados.



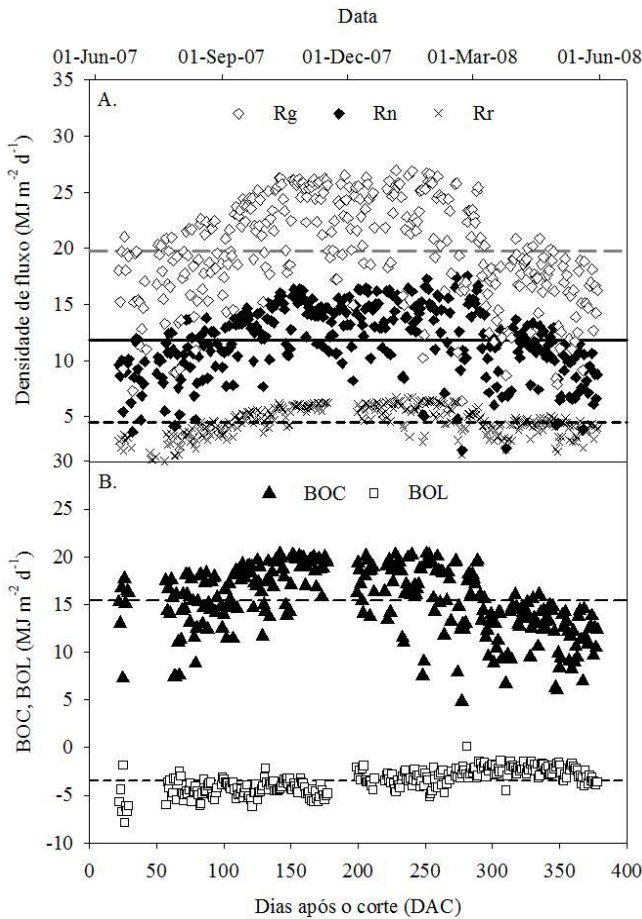
Obs.: Os resultados se referem ao ciclo de cana-soca, sob condições climáticas do município de Juazeiro, BA, situado no Semiárido brasileiro

Figura 2. Nível de cobertura do solo e índice de área foliar correspondentes, em função dos dias transcorridos após o corte da cana-de-açúcar irrigada, variedade RB92579 (A). Incremento médio da estatura dos colmos durante o ciclo da cultura (B)

Componentes do balanço de radiação e de energia

Nas Figuras 3 e 4 estão os valores das densidades de fluxo dos componentes do balanço de radiação (R_g , R_n , R_r , BOC e BOL) e das relações de R_n e de R_r com R_g , respectivamente.

Pode-se observar que, no início do ciclo de cultivo da cana-de-açúcar, os valores da radiação solar global (R_g) se mostravam ascendentes até a próxima ocorrência da cobertura total do solo (aos 132 DAC); no entanto, a partir desta data até aos 300 DAC, a R_g tende a se estabilizar em um patamar acima de $20 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Finalmente apresentou, na sequência, uma redução gradativa, até o final do seu ciclo fenológico (~390 DAC) (Figura 3).



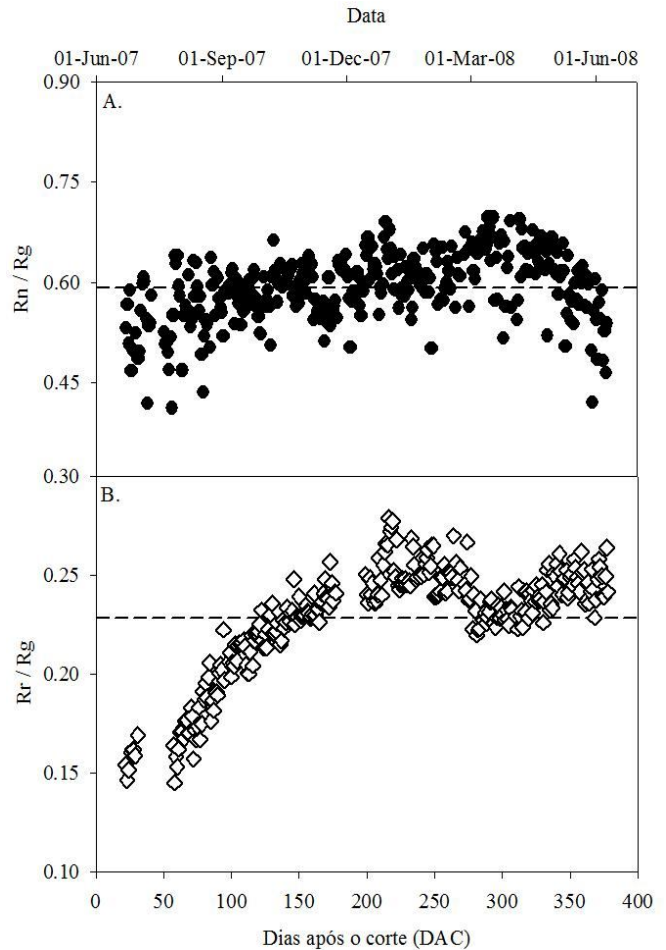
Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo

Figura 3. Densidade de fluxo da radiação solar global (Rg), saldo de radiação (Rn) e radiação refletida (Rr) (A) e balanço de ondas curtas (BOC) e de ondas longas (BOL) (B) ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do município de Juazeiro, BA, Semiárido brasileiro

No período antecedente aos 132 DAC, o Rn era reduzido (Figura 3A), em decorrência dos baixos valores de Rg (Figura 3A) e de IAF (Figura 2A). Este fato intensificou a emissão de radiação de ondas longas do solo para a atmosfera, o que resultou em valores mais negativos do BOL (Figura 3B). Neste mesmo período se constatou que o valor médio diário do BOC foi de $15,5 \pm 3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, enquanto o do BOL foi igual a $-4,5 \pm 1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ reduzindo, assim, a relação Rn/Rg (Figura 4A).

Após os 132 DAC e mesmo se tendo verificado aumento da magnitude da radiação refletida (Figura 3A), os valores de BOC se tornaram mais elevados em virtude do incremento da incidência de radiação solar global, ante o que os valores de Rn/Rg se mostraram superiores quando comparados aos obtidos no período precedente (Figura 4A). Por outro lado, com o aumento do valor do IAF a quantidade de radiação associada ao BOL apresentou tendência decrescente (menos negativa), em função da maior retenção de energia pelo dossel da cultura e, conseqüentemente, menor incidência de radiação solar sobre a superfície do solo (Figuras 3A e 3B). Este comportamento continuou até os 300 DAC, quando se

observou um ligeiro aumento dos valores de BOL (mais negativos). Este resultado se deve, sem dúvida, à menor emissão efetiva de radiação de ondas longas pela atmosfera, durante o período noturno. Constatou-se a partir dos 348 DAC e devido à suspensão da irrigação e da redução do IAF (Figura 2A), uma absorção de energia pelo solo e menor retenção de energia pelo dossel da cultura.



Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo

Figura 4. Relação entre o saldo de radiação (Rn) e a radiação solar global (Rg) (A) e relação entre a radiação solar refletida (Rr) e a Rg (B) ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do município de Juazeiro, BA, Semiárido brasileiro

O aumento do BOL, associado à redução dos valores de BOC, proporcionou reduções na relação Rn/Rg ao final do ciclo da cultura, em razão sobretudo da diminuição do suprimento de radiação (Figura 4A). Neste período os valores médios de BOC e de BOL foram iguais, respectivamente, a $15,4 \pm 3,5$ e $-3,5 \pm 1,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figura 3B), resultando em um valor médio $59 \pm 5\%$ para a relação Rn/Rg para todo o ciclo da cana-de-açúcar tipo soca. Contudo, a magnitude desta relação depende do tipo de superfície; Teixeira et al. (2008), comparando a relação Rn/Rg determinadas em áreas cultivadas com videira de vinho e de mesa, mangueira sob condições irrigadas e área nativa de caatinga, obtiveram valores de 46, 55, 51 e 50%,

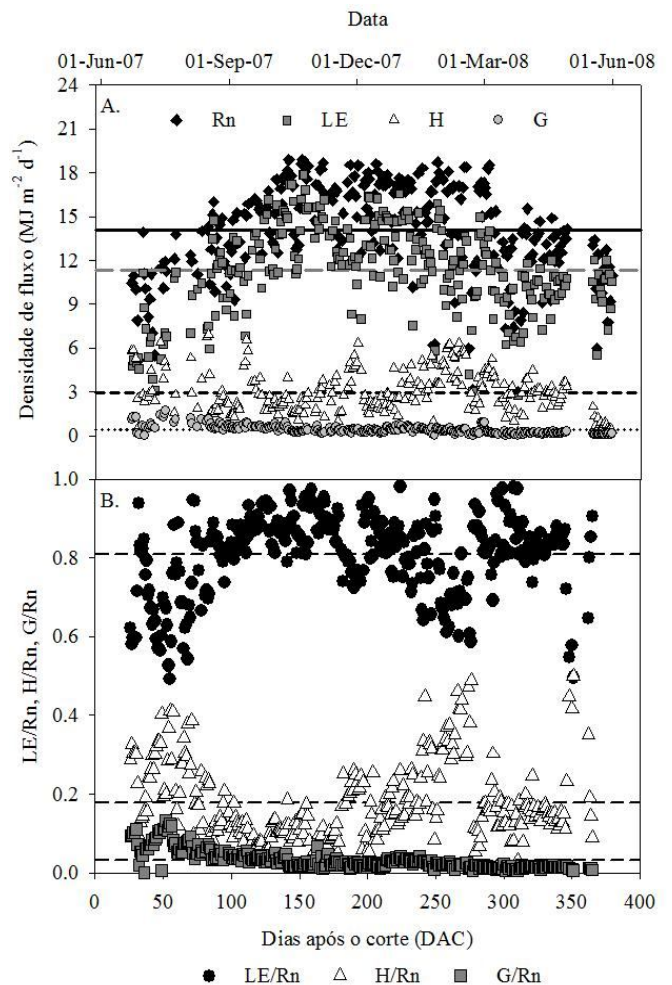
respectivamente. Yunusa et al. (2004), quantificando os componentes do balanço de energia para a videira cultivada com irrigação por gotejamento, verificaram valores médios de Rn/Rg em torno de 60%.

Analisando-se a relação entre as radiações refletida e incidente, ou seja, o albedo ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada, observou-se que os menores valores ($19 \pm 2\%$) foram constatados no início do ciclo (aos 132 DAC) (Figura 4B), quando o valor de NCS era inferior a 80% e, portanto, havia uma exposição maior da superfície do solo; em seguida, notou-se aumento do valor deste parâmetro até 250 DAC mas se observa, em torno dos 300 DAC, uma ligeira redução ($\sim 2\%$) dos valores de Rn/Rg, em decorrência da diminuição da quantidade de radiação refletida, principalmente durante o período chuvoso. Este comportamento pode ser explicado pela arquitetura do dossel vegetativo da cana-de-açúcar, que proporciona retenção de uma parte considerável da água precipitada na superfície de suas folhas (Castilho, 2000). Após o período chuvoso se constatou um novo aumento da relação Rr/Rg. Os valores do albedo oscilaram entre 15% e 27%, com valor médio de $23 \pm 3\%$ para o ciclo da cultura, resultado este é bastante semelhante ao citado por Juárez (2004), que obteve um valor médio de 21% para cana-de-açúcar, com variações entre 15 e 25%, sendo que o padrão sazonal demonstrou valores mínimos na estação chuvosa e máximos na estação seca. Cabral et al. (2003) encontraram valores variando entre 12 e 32% para a cana-de-açúcar não irrigada, a depender da fase de crescimento da cultura.

Na Figura 5 se encontram as magnitudes dos fluxos de energia (LE, H e G) e suas relações com os valores de Rn durante o ciclo da cana-de-açúcar irrigada. Os valores de LE foram sempre superiores aos de H, mas no início do crescimento, no período de tombamento da planta e ao final do ciclo, quando ocorreu a suspensão da irrigação, os valores de H se tornaram ligeiramente maiores em relação ao valor médio do ciclo (Figura 5A). No período inicial de crescimento até 90 DAC, quando os intervalos de irrigação eram da ordem de 15 dias (dados não mostrados), observou-se que os valores de H variaram entre 0,5 e 5,9 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com média de $2,7 \pm 1,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, que correspondeu a 23% do Rn (Figura 5B). Correspondentemente, nota-se que os valores de LE variaram entre 3,8 e 16,4 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com média em torno de $10,2 \pm 2,9 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, enquanto a fração de G compreendeu, em média, a $7 \pm 3\%$ de Rn (Figura 5B), em decorrência do baixo IAF (Figura 2A).

No período de tombamento das plantas, compreendido entre 154 e 273 DAC, foi alta a exposição das folhas mortas. Este período esteve caracterizado por elevados valores de H, cuja média alcançou $19 \pm 10\%$ de Rn, tendo variado entre 0,4 e 8,1 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Figura 5A). Em relação ao LE, seus valores oscilaram entre 5,2 e 18,1 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com média de $13,0 \pm 2,7 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$. No que concerne ao fluxo de calor no solo, constatou-se que seu valor médio alcançou apenas $2 \pm 1\%$ de Rn (Figura 5B), devido ao maior nível de cobertura do solo (Figura 2A).

Na fase final do ciclo de cultivo ($> 348 \text{ DAC}$), o valor de G foi de apenas 1% de Rn, ao passo que os valores de H se mostraram bastante elevados (Figura 5A). Este comportamento está associado à suspensão da irrigação, diminuição do IAF e do acúmulo de palhada sobre a superfície do solo, que



Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo

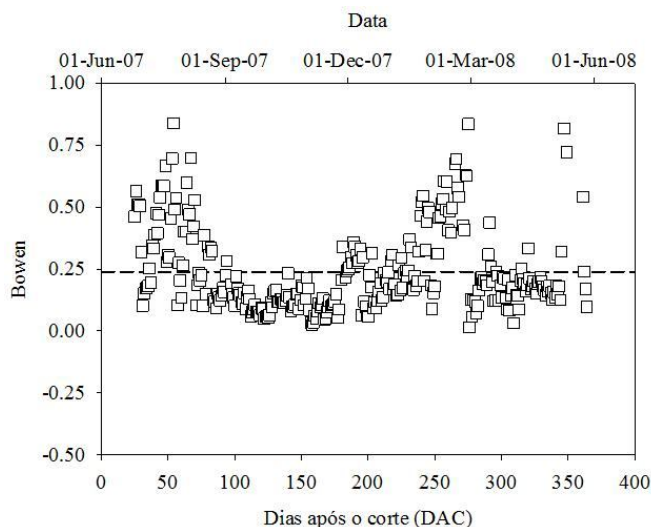
Figura 5. Saldo de radiação (Rn), densidade do fluxo de calor latente (LE), de calor sensível no ar (H) e de calor sensível no solo (G) em função do número de dias transcorridos após o corte da cana-de-açúcar irrigada, variedade RB92579 (A). Relações LE/Rn, H/Rn e G/Rn ao longo do ciclo (B). As medições foram realizadas no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do município de Juazeiro, BA, Semiárido brasileiro

resultaram em valores oscilando entre 1,2 e 4,2 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, correspondendo a $31 \pm 16\%$ do Rn; já o valor de LE representou $69 \pm 16\%$ de Rn, com valores oscilando entre 2,9 e 12,2 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (Figura 5A).

Analisando as contribuições de H e de LE em termos da razão de Bowen (β), constatou-se que, no início do ciclo, o valor médio de β foi de $0,35 \pm 0,18$, com máximo de 0,84 e mínimo de 0,09. Esta variação foi menor para o período de tombamento da cana, quando os valores de β oscilaram entre 0,02 e 0,69. Ao final do ciclo o valor médio de β foi de $0,51 \pm 0,35$, com oscilação entre 0,10 e 1,01.

Determinando-se os valores médios dos componentes do balanço de energia para todo o ciclo da cultura, tem-se que o valor médio de LE variou em torno de $11,5 \pm 3,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com oscilações entre 2,9 e 18 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, correspondendo a 81% do Rn. O H representou $16 \pm 10\%$ de Rn, variando entre 0,4 e 8,1 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com média de $2,5 \pm 1,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, enquanto o valor

de G foi, em média, de $3 \pm 2\%$ do Rn, estando compreendido entre $-1,2$ e $1,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Finalmente, o valor médio de β para o ciclo foi de $0,27 \pm 0,16$ (Figura 6). Toledo Filho (2001) observou que os valores de LE, H e G responderam por 67, 28 e 5% de Rn, respectivamente, para a cana-de-açúcar não irrigada, e Cabral et al. (2003) constataram que os valores de LE responderam por 70% da precipitação registrada (1.351 mm) sob condições de sequeiro. Brauner et al. (2008) relataram, para a cana-de-açúcar não irrigada sob condições climáticas do município de Pilar, AL, que o LE respondeu por apenas 37% de Rn, ao passo que a maior contribuição foi do H, com 61% e apenas 2% para o G



Obs.: A linha tracejada indica o valor médio do ciclo

Figura 6. Variação dos valores médios diários da razão de Bowen ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar irrigada (variedade RB92579), no ciclo de cana-soca, sob as condições climáticas do município de Juazeiro, BA, Semiárido brasileiro

CONCLUSÕES

1. Foi possível inferir que 62,7% dos dados avaliados foram classificados como aceitáveis para serem utilizados na estimativa dos fluxos de calor sensível e latente, ao longo do ciclo da cultura;

2. Os valores dos componentes do balanço de radiação foram afetados pelo suprimento de radiação solar global, nível de cobertura do solo e características do dossel da cultura. Esses fatores resultaram em menores valores da relação Rn/Rg no início e final do ciclo de cultivo, no aumento da magnitude do balanço de radiação de ondas longas quando o IAF era reduzido e em reduções no albedo durante o período chuvoso;

3. A maior parte (81%) da energia disponível na interface cana-de-açúcar/atmosfera foi destinada ao LE. Entretanto, o H se tornou ligeiramente maior, em relação a sua média ($H/Rn \sim 16\%$) no início do crescimento da cultura, no período de tombamento da planta e ao final do ciclo. O G apresentou maior importância ($G/Rn \sim 7\%$) apenas até o momento em que o nível de cobertura do solo era inferior a 80%.

LITERATURA CITADA

- Amaral, F. C. S. do; Fernandes, L. A. C.; Araújo Filho, A. A.; Vieira, V. J. De S.; Faria Júnior, W. G. Influência da irrigação na condutividade hidráulica de um Vertissolo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 35p. Boletim de Pesquisa 113
- Asseng, S.; Hsiao, T. C. Canopy CO_2 assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. *Field Crops Research*, Amsterdam, v.67, p.191-206, 2000.
- Baldocchi, D.; Kelleher, F.; Blzck, T. A.; Jarvis, P. Climate and vegetation controls on boreal zone energy exchange. *Global Change Biology*, v.6, p.69-83, 2000.
- Brauner, D. C.; Costa, G. B.; Leão, I. B. Parâmetros meteorológicos na cultura da cana-de-açúcar, no município de Pilar-AL. In: Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil, 9, 2008, Maceió. Anais... Maceió: STAB, 2008. p.734-739.
- Cabral, O. M. R.; Rocha, H. R.; Ligo, M. A. V.; Brunini, O.; Dias, M. A. F. S. Fluxos turbulentos de calor sensível, vapor d'água e CO_2 sobre plantação de cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.) em Sertãozinho-SP. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.18, p.61-70, 2003.
- Castilho, C. P. G. de. Interceptação de chuvas na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum* ssp.). Campinas: UNICAMP, 2000. 274p. Dissertação Mestrado
- Gavilán, P.; Berengena, E. J. Accuracy of the Bowen ratio-energy balance method for measuring latent heat flux in a semiarid advective environment. *Irrigation Science*, v.25, p.127-140, 2007.
- Inman-Bamber, N. G.; Mcglinchey, M. G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research*, v.83, p.125-138, 2003.
- Juárez, R. I. N. Variabilidade climática regional e controle da vegetação no sudeste: um estudo de observações sobre cerrado e cana de açúcar e modelagem numérica da atmosfera. São Paulo: USP, 2004. 193p. Tese Doutorado
- Kjaersgaard, J. H.; Plauborg, F.; Mollerup, M.; Petersen, C. T.; Hansen, S. Crop coefficients for winter wheat in a sub-humid climate regime. *Agricultural Water Management*, v.95, p.918-924, 2008.
- Lima, J. R. de; Antonino, A. C. D.; Soares, W. de A.; Borges, E.; Silva, I. de F. da; Lira, C. A. B de O. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo paraibano. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.527-534, 2005.
- Molder., M.; Grelle, A.; Lindroth, A.; Halldin, S. Flux-profile relationships over a boreal forest - roughness sublayer corrections. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.98-99, p.645-658, 1999.
- Ohmura, A. Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations. *Journal Applied Meteorology*, v.21, p.595-598, 1982.

- Oliveira, G. M. de; Leitão, M. V. B. R. Estimativas de evapotranspiração e as conseqüências devido aos erros na determinação de saldo de radiação e efeitos advectivos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, p.343-347, 2000.
- Ortega-Farias, S. O.; Cuenca, R. H.; Ek, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.81, p.131-143, 1996.
- Perez, P. J.; Castellvi, F.; Ibañez, M.; Rosell, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.97, p.141-150, 1999.
- Qin, Z.; Ouyang, Y.; Su, G.; Yu, Q.; Li, J.; Zhang, J.; Wu, Z. Characterization of CO₂ and water vapor fluxes in a summer maize field with wavelet analysis. *Ecological Informatics*, v.3, p.397-409, 2008.
- Rana, G.; Katerji, N. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: A review. *European Journal of Agronomy*, v.13, p.125-153, 2000.
- Righi, E. Z.; Angelocci, L. R.; Marin, F. R. Energy balance of a young drip-irrigated coffee crop in southeast Brazil: an analysis of errors and reliability of measurements by the Bowen ratio method. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.15, p.367-279, 2007.
- Silva, L. D. B.; Folegatti, M. V.; Villa Nova, N. A. Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem. *Engenharia Agrícola*, v.25, n.3, p.705-712, 2005.
- Silva, T. J. A. análise de crescimento, interação biosfera-atmosfera e eficiência do uso de água da cana-de-açúcar irrigada no Submédio do Vale do São Francisco. Viçosa: UFV, 2009. 194p. Tese Doutorado
- Shen, Y.; Zhang, Y.; Kondoh, A.; Tang, C.; Chen, J.; Xias, J.; Sakllra, Y.; Liu, C.; Sun, H. Seasonal variation of energy partitioning in irrigated lands. *Hydrological Processes*, v.18, p.2223-2234, 2004.
- Souza, C. B. de; Silva, B. B. da; Azevedo, P. V. de; Silva, V. de P. R. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro1. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.400-407, 2008.
- Souza, P. J. de O.; Ribeiro, A.; Rocha, E. J. P da; Loureiro, R. S.; Bispo, C. J. C.; Sousa, A. M. L. Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.65-73, 2010.
- Steduto, P.; Hsiao, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.89, p.169-184, 1998.
- Teixeira, A. H. de C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, p.28-32, 2001.
- Teixeira, A. H. de C.; Bastiaanssen, W. G. M.; Ahmad, N. D.; Moura, M. S. B.; Bos, M. G. Analysis of energy fluxes and vegetation-atmosphere parameters in irrigated and natural ecosystems of semi-arid Brazil. *Journal of Hydrology*, v.362, p.110-127, 2008.
- Teixeira, A. H. de C.; Bastiaanssen, W. G. M.; Bassoi, L. H. Crop water parameters of irrigated wine and table grapes to support water productivity analysis in the Sao Francisco river basin, Brazil. *Agricultural Water Management*, v.94, p.31-42, 2007.
- Todd, R. W.; Evett, S. R.; Howell, T. A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.103, p.335-348, 2000.
- Toledo Filho, M. da R. Estudo micrometeorológico de um cultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) no estado de Alagoas. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 134p. Tese Doutorado
- Yunusa, I. A. M.; Walker, R. R.; Lu, P. Evapotranspiration components from energy balance, sapflow and microlysimetry techniques for an irrigated vineyard in inland Australia. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.127, p.93-107, 2004.