

BALANÇO DE RADIAÇÃO E ENERGIA DA CULTURA DE ALFACE EM ESTUFA DE POLIETILENO¹

VALÉRIA DE ALMEIDA FRISINA² e JOÃO FRANCISCO ESCOBEDO³

RESUMO - Objetivou-se, neste trabalho, determinar os balanços de radiação e energia da cultura de alface (*Lactuca sativa*, L. cv. Verônica) em estufa de polietileno. O experimento foi realizado em uma estufa tipo túnel alto com cobertura de polietileno (100 µm de espessura) e em uma área externa, ambas com 35 m². Durante o ciclo da cultura, foram monitoradas as radiações global e refletida, saldo de radiação, fluxo de calor no solo e temperatura do ar (seca e úmida) nos dois meios. Utilizou-se um Datalogger que operou na frequência de 1 Hz, armazenando médias de cinco minutos. A partir das integrações diárias das irradiâncias global (K_{\downarrow}) e refletida (K_{\uparrow}), verificou-se que a transmissividade média da radiação global ($K_{\downarrow in} / K_{\downarrow ex}$) foi aproximadamente constante, em torno de 79,59%, enquanto a razão das radiações refletidas ($K_{\uparrow in} / K_{\uparrow ex}$) foi igual a 69,21% com coeficiente de variação de 8,47%. As curvas normalizadas do saldo de radiação de ondas curtas em relação à radiação global (K^* / K_{\downarrow}), nos dois meios, mostraram ser aproximadamente constantes no início do ciclo e decrescentes no final. A relação (R_n / K_{\downarrow}) foi maior no meio externo, em torno de 12%, a partir da fase em que a superfície verde da cultura cobriu o solo. O balanço médio (L^*) de radiação de ondas longas foi maior no exterior, em torno de 50%. O balanço de energia, estimado em termos de fluxos verticais, mostrou, em média, que: no exterior, 83,07% do saldo de radiação foi convertido em calor latente (LE), 18,00% em fluxo de calor no solo (G) e 9,96% em calor sensível (H), enquanto que, no interior da estufa, 58,71% do saldo de radiação foi convertido em LE, 42,68% em H e 28,79% em G.

Termos para indexação: radiação global, radiação refletida, saldo de radiação, fluxos de calor.

RADIATION AND ENERGY BALANCE OF LETTUCE CULTURE INSIDE A POLYETHYLENE GREENHOUSE

ABSTRACT - The objective of this paper was to describe the radiation and energy balance, during the lettuce (*Lactuca sativa*, L. cv. Verônica) crop cycle inside a polyethylene greenhouse. The radiation and energy balance was made inside a tunnel greenhouse with polyethylene cover (100 µm) and in an external area, both areas with 35 m². Global, reflected and net radiation, soil heat flux and air temperature (dry and humid) were measured during the crop cycle. A Datalogger, which operated at 1 Hz frequency, storing 5 minutes averages was utilized. The global (K_{\downarrow}) and reflected (K_{\uparrow}) radiations showed that the average transmission of global radiation ($K_{\downarrow in} / K_{\downarrow ex}$) was almost constant, near to 79.59%, while the average ratio of reflected radiation ($K_{\uparrow in} / K_{\uparrow ex}$) was 69.21% with 8.47% standard-deviation. The normalized curves of short-wave net radiation, in relation to the global radiation (K^* / K_{\downarrow}), found for both environments, were almost constant at the beginning of cycle; this relation decreased in the final stage of culture. The normalized relation (R_n / K_{\downarrow}) was bigger in the external area, about 12%, when the green culture covered the soil surface. The long-wave radiation balance average (L^*) was bigger outside, about 50%. The energy balance, estimated in terms of vertical fluxes, showed that, for the external area, in average, 83.07% of total net radiation was converted in latent heat evaporation (LE), and 18% in soil heat flux (G), and 9.96% in sensible heat (H), while inside of the greenhouse, 58.71% of total net radiation was converted in LE, 42.68% in H, and 28.79% in G.

Index terms: global radiation, reflected radiation, net radiation, heat fluxes.

¹ Aceito para publicação em 23 de novembro de 1998.
Trabalho parcialmente financiado pelo CNPq e FAPESP.

² Bióloga, aluna do curso de doutorado, Faculdade de Ciências

Agronômicas (FCA), UNESP, Caixa Postal 237, CEP 18603-970 Botucatu, SP.

³ Físico, Dr., Dep. de Ciências Ambientais, FCA/ UNESP. E-mail: escobedo@fca.unesp.br

INTRODUÇÃO

Embora o uso de casa de vegetação com cobertura de polietileno seja recente no Brasil, a criação de ambientes controlados vem ganhando cada dia mais usuários nas diversas áreas da agricultura (Alpi & Tognone, 1978). Segundo Schneider (1993), a principal vantagem desta técnica consiste na possibilidade de produção, principalmente de hortaliças, nos períodos de entressafra, permitindo maior regularização da oferta e melhor qualidade dos produtos.

Sabe-se que as estufas provocam grandes alterações nos elementos meteorológicos, que apresentam importância vital às plantas para sua manutenção e desenvolvimento, através da fotossíntese, evapotranspiração, fototropismo, morfogenia, formação de pigmentos, entre outros. No entanto, na literatura nacional encontram-se poucas informações numéricas e precisas dessas modificações.

No Brasil, os primeiros trabalhos com elementos meteorológicos em estufa de polietileno tiveram seu início no sul do País, graças aos trabalhos de Buriol et al. (1993, 1996, 1997), Farias et al. (1993a, 1993b, 1994), Schneider et al. (1993), Camacho et al. (1995), Martins & Fernandez Gonzalez (1995a, 1995b), Steck et al. (1996, 1997) e Dalsasso et al. (1997). Paralelamente, pesquisadores de outras regiões do País prestaram colaborações neste desenvolvimento, como Escobedo et al. (1994), Ricieri (1995), Pezzopane et al. (1995a, 1995b), Figueiredo et al. (1995), Frisina & Escobedo (1995), Frisina et al. (1997), Souza & Escobedo (1997), Assis & Escobedo (1997), Nascimento Filho et al. (1997) e Sentelhas et al. (1997).

Objetivou-se, no presente trabalho, efetuar os balanços de radiação e de energia da cultura de alface em estufa de polietileno tipo túnel alto, visando o fornecimento de parâmetros agrometeorológicos para uso racional de recursos hídricos nesse sistema.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Estação de Radiometria Solar de Botucatu, no período de 27/9/96 a 11/11/96. Foi feito o estudo do balanço de radiação e balanço de energia durante o ciclo da cultura de alface, em uma casa de vegetação e em uma área aberta, ambas com 35 m².

A casa de vegetação utilizada foi uma estufa tipo túnel alto com cobertura de polietileno (100 µm), com as seguintes dimensões: 7 m de comprimento; 5 m de largura; 2 m de altura do pé direito e 1,7 m de altura da concavidade do arco.

Foi utilizada a cultura de alface (*Lactuca sativa*, L.), cv. Verônica, adaptada ao verão, de folhas crespas e verde-claras.

As sementes foram semeadas em substrato comercial (plantimax hortaliças HA). Foram efetuadas três adubações com 200 ppm de nitrato de amônio e 160 ppm com nitrato de potássio. O transplante foi efetuado em 30/9/96, utilizando-se espaçamento 0,30 x 0,30 cm, em uma área plana, cujo solo é classificado como areia franca. De acordo com Souza (1996), a densidade global média do solo na profundidade de 0 a 20 cm era de 1,61 g/cm³, a densidade real entre 0 e 60 cm variou de 2,5 a 2,7 g/cm³; a porosidade total do solo entre 0 e 20 cm era de 39% e a análise granulométrica do solo, em média: 79,5% de areia, 6,8% de silte e 13,7% de argila. No plantio da cultura de alface, o solo foi bem revolvido e a ele incorporou-se esterco de coelho, curtido. A irrigação foi efetuada manualmente, com a utilização de uma mangueira comum.

A cada sete dias, durante o ciclo da alface, foram coletadas, aleatoriamente, duas plantas da estufa e duas da área externa para medição da altura e da área foliar.

A altura das plantas foi medida entre a base do caule e a extremidade da folha maior, utilizando-se uma régua. A área foliar das plantas foi estimada por meio de um medidor de área foliar.

Balanço de radiação de ondas curtas

O saldo de radiação de ondas curtas (K^*), definido pela diferença entre a radiação de ondas curtas que incide na superfície terrestre (radiação solar global) e a radiação de ondas curtas que é refletida, foi calculado pela equação:

$$K^* = K\downarrow - K\uparrow \quad (1)$$

onde: $K\downarrow$ é a irradiação global e $K\uparrow$ é a irradiação refletida.

Balanço de radiação de ondas longas

O saldo de radiação de ondas longas (L^*) foi obtido pela diferença entre o saldo de radiação total e o saldo de radiação de ondas curtas, conforme a equação:

$$L^* = R_n - K^* \quad (2)$$

onde: R_n é o saldo de radiação total, e K^* é o saldo de radiação de ondas curtas.

Balanço de energia

O balanço de energia da superfície vegetada foi calculado em termos de fluxos verticais, segundo o modelo:

$$R_n + G + LE + H + P \cong 0 \quad (3)$$

onde: R_n é a energia do saldo de radiação total diário disponível à superfície; G é o fluxo de calor no solo; LE é o fluxo convectivo de calor latente; H é fluxo convectivo de calor sensível, ambos estimados pelo método de Bowen (1926); P é a energia gasta nos processos fotossintéticos. A equação acima representa a partição do saldo de radiação total em fluxos de calor sensível e calor latente, fluxo de calor no solo e radiação convertida em biomassa, através de processos fotossintéticos.

Vários trabalhos envolvendo balanço de energia demonstraram que a energia utilizada nos processos fotossintéticos pode ser desconsiderada, sem acarretar erros significativos no balanço de energia, pois este termo raramente excede 2 a 5% do saldo de radiação total, estando, portanto, dentro dos limites de erro do método de estimativa do balanço de energia.

A razão de Bowen ($\beta = H/LE$) foi determinada de acordo com a equação de Webb (1965):

$$\beta = 1 / ((s + \gamma / \gamma) \cdot (\Delta T_u / \Delta T_s)) - 1 \quad (4)$$

onde: ΔT_u = diferença de temperatura de bulbo úmido entre dois níveis de altura; ΔT_s = diferença de temperatura de bulbo seco entre dois níveis de altura; s = tangente à curva de saturação de vapor sobre a água, no ponto da temperatura média úmida entre os níveis de medida; γ = constante psicrométrica reduzida.

A unidade $(s+\gamma)/\gamma$ foi determinada segundo metodologia descrita por Penman & Tanner (1967), pela equação:

$$(s+\gamma) / \gamma = 0,634 \exp(0,05979 \cdot T) + 1 \quad (5)$$

onde: T = temperatura média do ar ($^{\circ}C$), obtida pela média dos valores de temperatura do bulbo seco, medidos ao longo do dia.

A partir dos valores medidos de R_n e G e valores estimados de β , o fluxo convectivo de calor latente de evaporação foi estimado pela equação:

$$LE = -(R_n + G) / (1 + \beta) \quad (6)$$

Para o cálculo deste parâmetro, foram selecionados 12 dias do ciclo.

Instrumentação

As radiações global e refletida externa (ex) e interna (in) foram monitoradas por dois albedômetros de filmes finos (Frisina, 1998) com fatores de calibração:

$K_{1ex} = 8,13 \mu Vm^2/W$ (termopilha superior);

$K_{2ex} = 12,86 \mu Vm^2/W$ (termopilha inferior);

$K_{1in} = 12,77 \mu Vm^2/W$ (termopilha superior);

$K_{2in} = 15,20 \mu Vm^2/W$ (termopilha inferior).

O saldo de radiação total foi monitorado por dois saldo-radiômetros Rebs, com fatores de calibração iguais a $K_{SRex} = 75,80 \mu Vm^2/W$ e $K_{SRin} = 79,50 \mu Vm^2/W$, respectivamente, a 1 m a partir da superfície.

Os fluxos de calor no solo foram medidos diariamente por fluxímetros Rebs, com fatores de calibração $K_{ex} = 35,8 W/m^2mV$ e $K_{in} = 36,2 W/m^2mV$, instalados na estufa e área externa, a 1,0 cm de profundidade no solo.

Os fluxos convectivos de calor latente e sensível, estimados de acordo com a razão de Bowen (1926) e pelo método de Penman & Tanner (1967), a partir de medidas de temperatura do ar, seca e úmida, foram efetuadas, hora-a-hora, por meio de psicômetros de ventilação forçada com sensibilidade de décimo de grau, instalados em dois níveis de altura – 18 cm e 100 cm da superfície do solo –, no interior de microabrigos.

Todos os instrumentos foram instalados na região central da estufa, para diminuir possíveis efeitos causados pela variabilidade espacial da própria estufa (diferenças de temperatura, multireflexões provocadas pelas laterais).

Aquisição de dados

Na medição do balanço de radiação de ondas curtas e fluxo de calor no solo, foi utilizado um sistema de aquisição de dados constituído de um Datalogger, de oito canais, interligado a uma placa multiplexadora, de 32 canais, e um microcomputador 486 DX4. A comunicação entre o sistema de aquisição de dados e os radiômetros solares foi efetuada através de cabos coaxiais e a comunicação entre o Datalogger e o microcomputador, por meio de uma interface. O Datalogger operou na frequência de 1 Hz, captando uma leitura por segundo e armazenando médias de cinco minutos ou 300 leituras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Radiações global e refletida (K_{\downarrow} e K_{\uparrow})

A Fig. 1 mostra as curvas de irradiação ($MJ/m^2.dia$) global externa ($K_{\downarrow ex}$) e global interna ($K_{\downarrow in}$) e as refletidas externa ($K_{\uparrow ex}$) e interna ($K_{\uparrow in}$), nos dois meios.

As irradiações variaram em amplo intervalo: radiação global externa de 7,27 MJ/m².dia a 29,38 MJ/m².dia; global interna, de 5,59 MJ/m².dia a 23,85 MJ/m².dia; refletida externa, de 0,63 MJ/m².dia a 7,53 MJ/m².dia e refletida interna, de 0,67 MJ/m².dia a 6,22 MJ/m².dia. As radiações refletidas tiveram comportamento similar ao da radiação global. As variações da radiação global podem ser atribuídas às diferentes condições diárias de cobertura do céu.

A Fig. 2 mostra as relações da radiação global ($K_{\downarrow in} / K_{\downarrow ex}$) e refletida ($K_{\uparrow in} / K_{\uparrow ex}$) entre os meios interno e externo. A relação ($K_{\downarrow in} / K_{\downarrow ex}$) permaneceu aproximadamente constante durante o ciclo, com transmissividade média de 79,59%, e portanto, mostrando uma redução de 20,41%, provocada pela cobertura de polietileno. Esse resultado pode ser considerado normal, visto que a estufa, em que foi conduzido o experimento, já vinha sendo utilizada há aproximadamente seis meses, tempo suficiente para que a cobertura de plástico apresentasse envelhecimento natural e revestimento de partículas que normalmente se depositam com o tempo. Em cobertura de plástico nova, a transmissividade média situa-se entre 80% e 90%, e para tempos maiores de uso pode

variar entre 65 e 80%. Em um estudo sobre elementos meteorológicos em estufas, Camacho et al. (1995) constataram variação de transmissividade de 65 a 89% no período de um ano.

A curva da relação entre as refletidas interna e externa ($K_{\uparrow in} / K_{\uparrow ex}$) não apresentou o mesmo comportamento da radiação global. Durante os trinta primeiros dias, ocorreram muitas oscilações, sem tendência definida, e a partir do trigésimo dia a curva mostrou um crescimento progressivo. Nos primeiros trinta dias, estas variações ocorreram devido aos efeitos de cobertura do céu, que não foram iguais nos dois meios. No interior da estufa, há um aumento da componente difusa da radiação solar, que proporciona um aumento na refletida interna. A partir do trigésimo dia, a tendência crescente da curva ocorreu porque, neste período, o percentual da radiação refletida em relação à radiação incidente foi maior no interior da estufa. A altura e a superfície da copa da cultura interna já se encontravam em estágio mais avançado de desenvolvimento, provocando maiores taxas de reflexão do que na área externa. Em média, a relação entre a radiação refletida interna e externa foi de 69,21% com desvio-padrão de 8,47%.

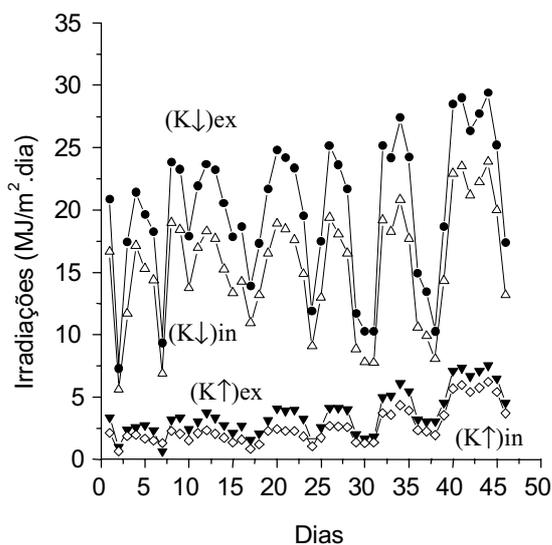


FIG. 1. Curvas de irradiações ($K_{\downarrow ex}$) (●); ($K_{\downarrow in}$) (Δ); ($K_{\uparrow ex}$) (▼) e ($K_{\uparrow in}$) (◇).

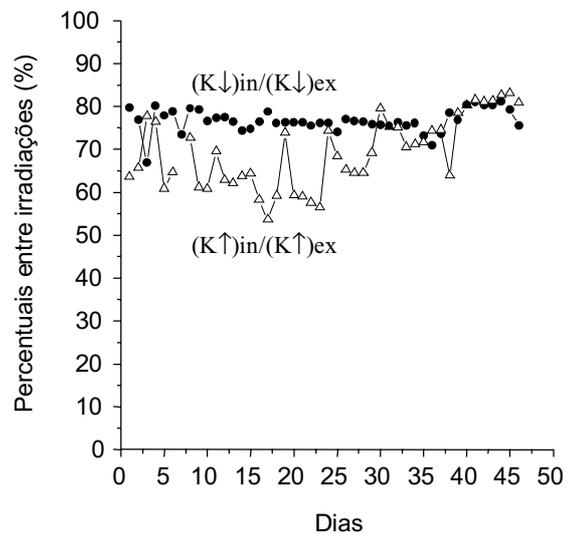


FIG. 2. Curva de relações entre as irradiações ($K_{\downarrow in} / K_{\downarrow ex}$) (●) e ($K_{\uparrow in} / K_{\uparrow ex}$) (Δ), em percentagens.

Saldo de radiação de ondas curtas (K^*)

A Fig. 3 mostra a variação do saldo de radiação de ondas curtas durante o ciclo. O intervalo de variação das irradiações do saldo radiação de ondas curtas externo apresentou um mínimo de 6,25 MJ/m².dia na condição de solo nu e máximo de 21,85 MJ/m².dia na fase final da cultura. No ambiente interno, variou de 4,92 MJ/m².dia a 17,63 MJ/m².dia. Em média, a irradiação do saldo de radiação foi de 16,43 MJ/m².dia na área externa e de 12,84 MJ/m².dia no interior da estufa.

Considerando as variações dos valores das irradiações diárias e o aumento do albedo, o saldo de radiação é melhor quantificado como um percentual da radiação global. Nesta representação, os saldos de radiação são normalizados em relação às radiações globais efetivamente incidentes na cultura, nos dois meios, conforme apresentado na Fig. 4. O comportamento é similar à curva de albedo da cultura (Frisina, 1998), com diferença apenas na fase final do ciclo, onde o saldo de radiação de ondas curtas é decrescente, como previsto pela equação (1). No período em que a radiação refletida permaneceu apro-

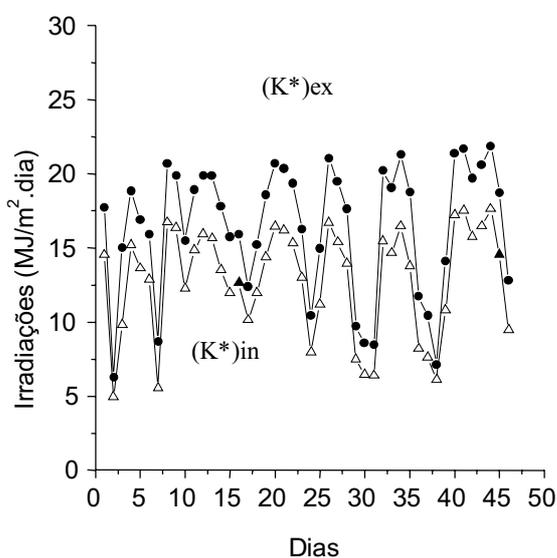


FIG. 3. Curvas de irradiações (MJ/m².dia) dos saldos de radiações de ondas curtas externo (K^*)ex (●) e interno (K^*)in (Δ).

ximadamente constante (21 dias iniciais), a relação $(K\downarrow - K\uparrow) / K\downarrow$ manteve-se constante e, posteriormente, com o crescimento progressivo de $K\uparrow$ a diferença passou a ser progressivamente decrescente. Na área externa, o percentual do saldo de radiação de ondas curtas médio foi de 85% da radiação global nos primeiros 25 dias e de aproximadamente 80% na segunda fase. No interior da estufa, o percentual foi de 88% na primeira fase, e de 80% após o vigésimo quinto dia. Esta redução, tanto na área externa quanto na interna, ocorreu provavelmente devido ao crescimento de área foliar da cultura, ocasionando aumento do albedo e, portanto, redução do saldo de radiação de ondas curtas.

Saldo de radiação

A Fig. 5 mostra o saldo de radiação total externo e interno durante o ciclo. Nota-se, pelos valores das irradiações, que os saldos de radiação na cultura externa e interna apresentaram comportamentos aproximadamente similares, com pequena superioridade de $(R_n)_{ex}$ no ambiente externo.

A variabilidade dos valores das irradiações, como visto anteriormente, foi conseqüência da variação da densidade de fluxo das radiações incidentes e refletidas durante o experimento. Os valores-limites foram: 2,71 MJ/m².dia e 15,89 MJ/m².dia referentes à cultura externa, e 3,06 MJ/m².dia e 15,11 MJ/m².dia referentes à cultura interna.

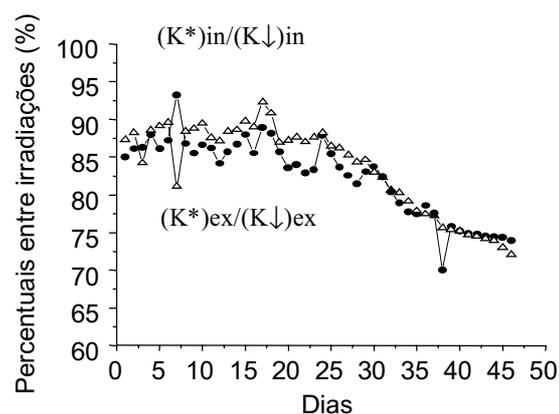


FIG. 4. Curvas de percentuais $(K^*)_{ex}/(K\downarrow)_{ex}$ (●) e $(K^*)_{in} / (K\downarrow)_{in}$ (Δ).

Em termos médios, o saldo de radiação externo apresentou valor de $11,83 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$ com desvio-padrão de 3,18, e o interno, média de $10,53 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$, e desvio-padrão de 3,11. Estatisticamente, os valores médios podem ser considerados iguais. Normalizando os valores do saldo de radiação em relação à radiação global, as curvas da Fig. 6 mostram que o percentual do saldo de radiação nos dois meios foi crescente nos dez primeiros dias, e na fase final ocorreu uma ligeira tendência de decréscimo. Considerando que o percentual do saldo de radiação de ondas curtas (Fig. 4) permaneceu constante no início do ciclo, supõe-se que os valores mais baixos ocorreram devido à contribuição do balanço de radiação de ondas longas, onde o substrato predominante era o solo.

O saldo de radiação de ondas longas contribuiu com valores negativos, pelo fato de a radiação terrestre ser maior do que a radiação emitida pela atmosfera. Do décimo ao vigésimo dia, os percentuais permaneceram relativamente constantes, e, posteriormente, a partir do vigésimo quinto dia, ocorreu um decréscimo, tendo um comportamento similar ao do saldo de radiação de ondas curtas, como espe-

rado, mesmo tendo o saldo de radiação de ondas longas contribuído com valores negativos (Fig. 7). Azevedo et al. (1997) estudaram o saldo de radiação sob uma cultura de videira. Os autores observaram aumento de 60 a 70% no percentual do saldo de radiação em relação à radiação global. No período inicial do ciclo, a razão SR/R_G foi de 61%, ao passo que no período de florescimento da cultura o percentual foi de 71%. Fontana et al. (1991b) estudaram o balanço de radiação durante o desenvolvimento de uma cultura de soja. Segundo os autores, as perdas de radiação de ondas longas foram inferiores às perdas de radiação de ondas curtas e, segundo eles, este efeito pode ser atribuído ao elevado índice de área foliar. Thomé (1985), citado por Fontana et al. (1991b), trabalhou com feijão e encontrou que, aumentando a densidade de cobertura do solo, as perdas de radiação de ondas longas diminuíram.

Em termos médios, o percentual do saldo de radiação em relação à radiação global foi de 59,26%, com desvio-padrão de 5,77 na cultura externa, e de 68,39% com desvio-padrão de 5,77 na cultura interna, percentuais estatisticamente diferentes.

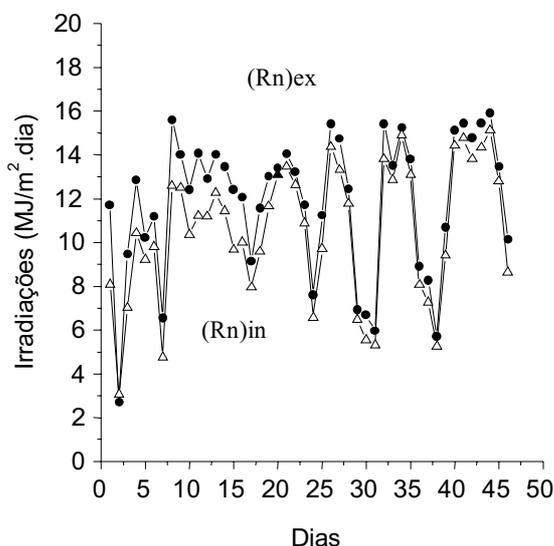


FIG. 5. Curvas de irradiações ($\text{MJ/m}^2\cdot\text{dia}$) dos saldos de radiação total externo $(Rn)_{ex}$ (●) e interno $(Rn)_{in}$ (Δ).

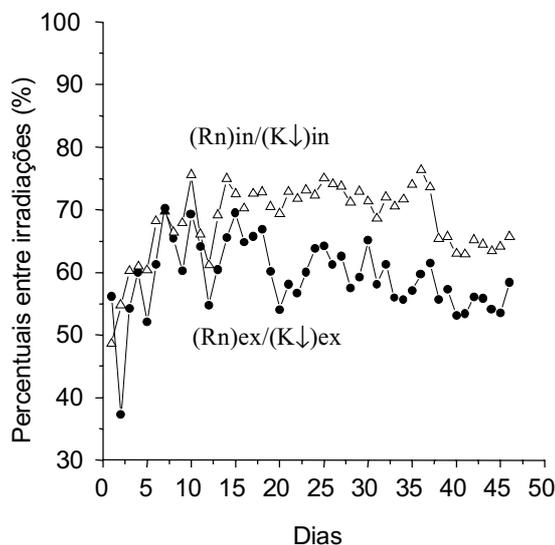


FIG. 6. Curvas de percentuais $(Rn)_{ex} / (K\downarrow)_{ex}$ (●) e $(Rn)_{in} / (K\downarrow)_{in}$ (Δ).

Estimativa do saldo de radiação de ondas longas (L*)

A partir dos resultados obtidos das medições do saldo de radiação (Rn) e saldo de radiação de ondas curtas (K*), determinou-se, através da equação (2), o balanço de radiação de ondas longas (L*). A Fig. 8 mostra curvas de irradiâncias K*, L* e Rn referentes a condições de céu aberto, como exemplo das três componentes diárias nos dois meios, e a Fig. 7 mostra curvas de energias diárias das radiações de ondas longas (L*) no ciclo. Pode-se observar que, nos dois meios, o saldo de radiação de ondas longas foi negativo, com maiores valores na cultura externa.

O saldo de ondas longas externo teve como limite mínimo -1,47 MJ/m².dia e máximo de -7,30 MJ/m².dia, e o interno, de -0,12 MJ/m².dia e -6,44 MJ/m².dia. Em média, o saldo de ondas longas externo foi maior que o interno, apresentando os seguintes resultados: -4,60 MJ/m².dia na cultura externa, e -2,32 MJ/m².dia na interna.

A Fig. 9 mostra o percentual do saldo de radiação de ondas longas sobre o saldo total. Durante o ciclo, os percentuais apresentaram limites de -25,83% e -65,26% na cultura externa e de -1,49% e -47,72% na cultura interna. Em média, os percentuais foram: -37,92% na área externa, e -20,99% dentro da estufa.

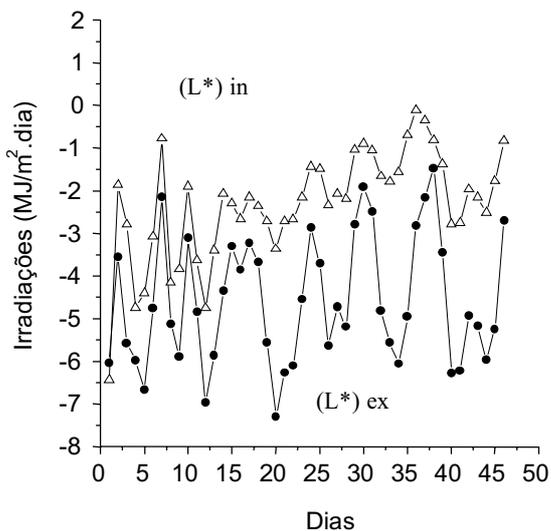


FIG. 7. Curvas de irradiações (MJ/m².dia) dos saldos de radiações de ondas longas (L*)ex (●) e (L*)in (Δ).

Balanço de energia

Como exemplo do comportamento diário dos componentes do balanço de energia – saldo de radiação (Rn), fluxo de calor no solo (G), fluxo convectivo de calor latente de evaporação (LE) e fluxo de calor sensível (H) – as curvas, na Fig. 10, mostram o balanço de energia, monitorados nos dois meios, no dia 10/10/96.

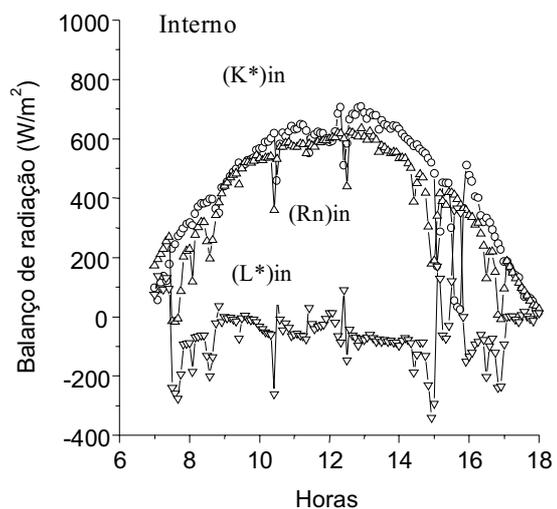
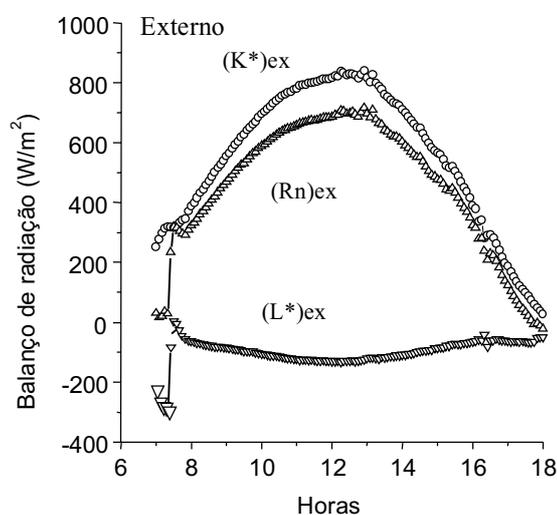


FIG. 8. Curvas de saldo de radiações K* (○), L* (●) e Rn (Δ) para condição de céu aberto.

Neste dia, o saldo de radiação atingiu densidade de fluxo máximo de 750 W/m^2 na área externa e 650 W/m^2 no interior da estufa. Com a integração das áreas abaixo das curvas, obtiveram-se os valores das energias: $14,92 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$ para $(Rn)_{ex}$ e $10,78 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$ para $(Rn)_{in}$.

O fluxo convectivo de calor latente (LE) apresentou a segunda maior participação no balanço de energia, com os seguintes valores de energias: $11,47 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$ no exterior e $6,69 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$ na estufa.

O fluxo convectivo de calor sensível (H) apresentou participação mínima no balanço de energia no interior da estufa, correspondendo a $-0,07 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$. O sinal negativo representa a transferência de calor da superfície para o ar, o que é normal durante o processo de evaporação. Na área externa, o fluxo de calor sensível atingiu os picos de -100 W/m^2 às 10h e 150 W/m^2 por volta das 11h. A energia diária foi de $0,47 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$. O sinal positivo representa ocorrência de condições de inversão do gradiente de temperatura, ou seja, transferência de calor do ar para o sistema, condição esta também observada por Pedro Júnior & Villa Nova (1981).

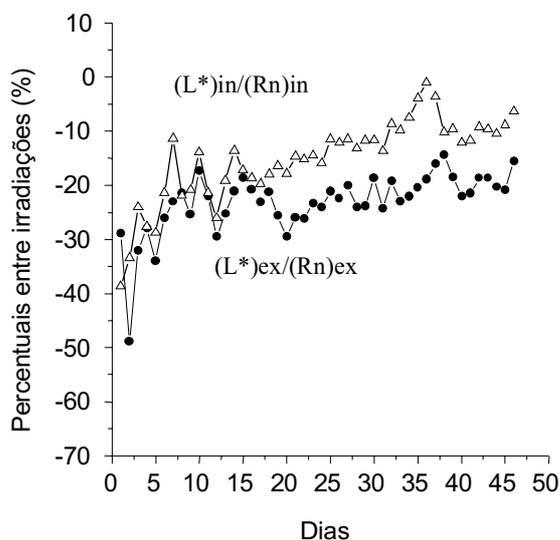


FIG. 9. Curvas de percentuais $(L^*)_{ex}/(Rn)_{ex}$ (●) e $(L^*)_{in}/(Rn)_{in}$ (Δ).

O fluxo de calor no solo atingiu picos de -150 W/m^2 na área externa e -200 W/m^2 na estufa, apresentando valores de energia de $-2,99 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$ e $-4,16 \text{ MJ/m}^2\cdot\text{dia}$, respectivamente. Os valores negativos representam fluxos da superfície para as camadas mais internas do solo. Os picos máximos foram atingidos por volta das 12h, horário de grande incidência de radiação, o que proporciona máximo fluxo de calor no solo, da superfície para o interior.

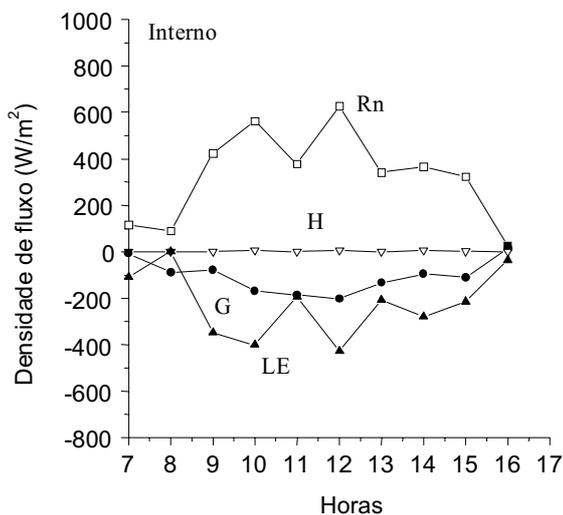
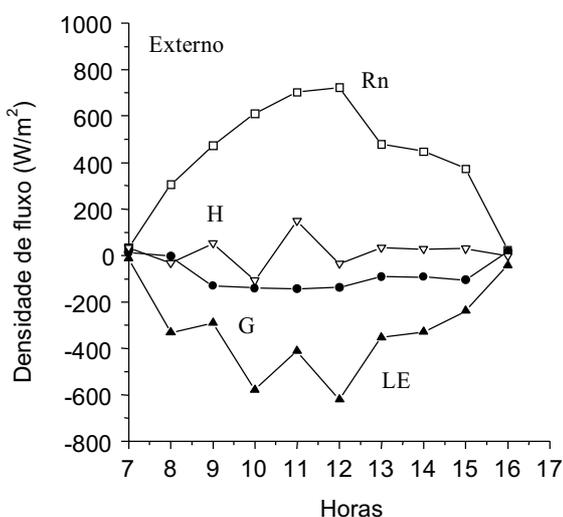


FIG. 10. Densidades de fluxo dos componentes do balanço de energia (10/10/96) - G (●), LE (▲), H (▽) e Rn (□).

A Fig. 11 mostra a variação dos componentes do balanço de energia ao longo dos 12 dias de observação durante o ciclo da alface.

Pode-se observar, pelos gráficos, que o saldo de radiação apresentou comportamento semelhante nas duas condições, com e sem cobertura de polietileno, com menor densidade de energia na área interna. O saldo de radiação externo médio foi de

(14,95 ± 1,87) MJ/m².dia, e o interno, de (12,90 ± 1,98) MJ/m².dia. Em ambos os casos, o coeficiente de variação foi da ordem de 15% aproximadamente, em consequência da variação das condições de nebulosidade dos dias ao longo do ciclo.

Os fluxos de calor no solo também apresentaram comportamentos semelhantes nas duas condições, sendo os valores médios iguais a (-2,44 ± 1,15) MJ/m².dia sem cobertura, e (-3,75 ± 1,49) MJ/m².dia na estufa. Em percentuais, a variação durante o ciclo foi de 47% e 40%, respectivamente.

Os fluxos de calor latente externo e interno apresentaram valores médios de (-12,65 ± 3,80) MJ/m².dia e (-7,47 ± 4,95) MJ/m².dia, respectivamente. No interior da estufa, a variação do fluxo de calor latente foi maior, correspondente a 66%; na área externa, a variação foi de 30%. Os fluxos de calor sensível médios (0,35 ± 2,08) MJ/m².dia na área externa e (-0,88 ± 7,70) MJ/m².dia na estufa. Estes valores correspondem a variações de 594% na área externa e 875% no interior da estufa.

A maior variação dos fluxos de calor latente e sensível no interior da estufa em relação à variação ocorrida na área externa pode ser considerada como consequência da própria cobertura de polietileno da estufa, que impede a saída natural do fluxo de calor do sistema para o ambiente.

A Fig. 12 representa curvas de percentuais G/Rn, LE/Rn e H/Rn ao longo do ciclo.

Em média, na área externa, os percentuais obtidos foram: G/Rn = 18,00%; LE/Rn = 83,07% e H/Rn = 9,96%. A maior porção do saldo de radiação total externo foi utilizada nos processos de evaporação, em segundo lugar para o aquecimento do solo e, na menor parte, para aquecimento do ar. No interior da estufa, os percentuais foram: G/Rn = 28,79%; LE/Rn = 58,71% e H/Rn = 42,68%.

Os resultados mostram que no ambiente coberto houve um aumento significativo do fluxo de calor sensível em relação à área externa, inclusive superando o fluxo de calor no solo. Desta forma, na estufa, a maior porção do saldo de radiação total foi utilizada nos processos de evaporação, aquecimento do ar e, em menor parte, aquecimento do solo. Em ambos os ambientes, a soma dos percentuais dos com-

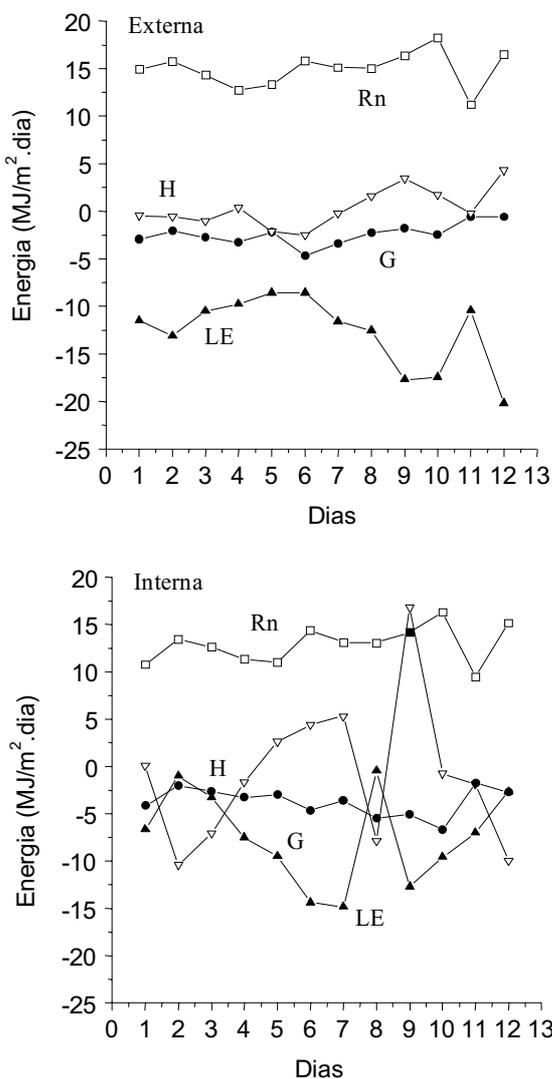


FIG. 11. Curvas de variação dos componentes do balanço de energia - G (●), LE (▲), H (▼) e Rn (□).

ponentes do balanço de energia ultrapassou 100%, o que demonstra ter ocorrido influência de processos de advecção ou mesmo que o método tenha superestimado os fluxos de calor latente e sensível.

De modo geral, a maior parte dos trabalhos de balanço de energia em cultura demonstram que o maior percentual do saldo de radiação é convertido

em fluxo de calor latente de evaporação (Pedro Júnior & Villa Nova, 1981; Alfonsi et al., 1986; Cunha et al., 1989; Fontana et al., 1991a). Segundo Villa Nova, citado por Prates et al. (1987), a proporção na qual se distribui o saldo de radiação entre os três componentes depende da água disponível para evaporação, fatores relacionados ao solo e cobertura vegetal.

CONCLUSÕES

1. Os níveis das irradiâncias global e refletida no interior da estufa acompanham as irradiâncias externas com menores intensidades, devido à redução provocada pela cobertura de polietileno.

2. A transmissividade da radiação global pelo polietileno não varia durante o ciclo da alface, mostrando ser independente da superfície vegetada.

3. A razão entre as radiações refletidas interna e externa apresenta variação ao longo do ciclo, provavelmente devido ao maior crescimento da cultura dentro da estufa.

4. O saldo de radiação de ondas curtas, maior no exterior do que no meio interno, não caracteriza maior nível de conversão da energia da radiação global.

5. A perda de radiação por emissão de radiação de ondas longas é maior no meio externo.

6. O fluxo de calor latente de evaporação é maior no meio interno, enquanto os fluxos de calor no solo e sensível são maiores no interior da estufa.

REFERÊNCIAS

- ALFONSI, R.R.; SANTOS FILHO, B.G. dos; PEDRO JÚNIOR, M.J.; BRUNINI, O.; CAMARGO, M.B.P. de. Balanço de energia em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, n.12, p.1233-1235, 1986.
- ALPI, A.; TOGNONE, F. **Cultura em estufa**. Lisboa: Presença, 1978. 196p.
- ASSIS, S.V.; ESCOBEDO, J.F. Influência do ângulo de elevação solar no albedo da cultura de alface (*Lactuca sativa*, L.) medido em estufas de polietileno tipo túnel e externamente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p.476-478.

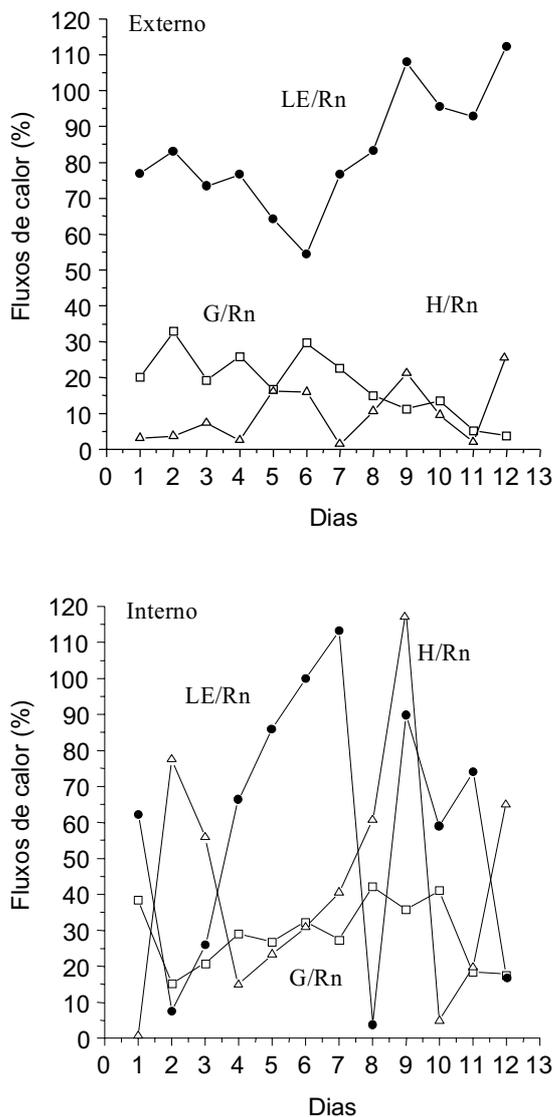


FIG. 12. Curvas dos percentuais: G/Rn (□), LE/Rn (●) e H/Rn (△).

- AZEVEDO, P.V. de; TEIXEIRA, A.H. de C.; SILVA, B.B. da; SOARES, J.M.; SARAIVA, F.A.M. Avaliação da reflectância e do saldo de radiação sobre um cultivo de videira europeia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.1-7, 1997.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review Service**, Ithaca, v. 27, p.779-787, 1926.
- BURIOL, G.A.; LUFT, S.V.L.; HELDWEIN, A.B.; STRECK, N.A.; SCHNEIDER, F.M. Efeito da ventilação sobre a temperatura e umidade do ar em túneis baixos de polietileno transparente e o crescimento da alface. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.17-24, 1997.
- BURIOL, G.A.; SCHNEIDER, F.M.; ESTEFANEL, V.; ANDRIOLO, J.L.; MEDEIROS, S.L.P. Modificação na temperatura mínima do ar causada por estufas de polietileno transparente de baixa densidade. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, p.43-49, 1993.
- BURIOL, G.A.; STRECK, N.A.; SCHNEIDER, F.M.; HELDWEIN, A.B. Temperatura e umidade de um solo coberto com plásticos transparentes. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, n.2, p.1-6, 1996.
- CAMACHO, M.J.; ASSIS, F.N.; MARTINS, S.R.; MENDEZ, M.E.G. Avaliação de elementos meteorológicos em estufa plástica em Pelotas, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.3, p.19-24, 1995.
- CUNHA, G.R. da; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MATZENUER, R. Balanço de energia em cultura de milho: estudo de casos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 6., 1989, Maceió. **Anais**. Maceió: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1989. p.417-426.
- DALSASSO, L.C.M.; HELDWEIN, A.B.; BURIOL, G.A.; SCHNEIDER, F.M.; STRECK, N.A.; DALMAGO, G.A. Consumo d' água do tomateiro tipo salada em estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.61-67, 1997.
- ESCOBEDO, J.F.; MELO, J.M.D.; FRISINA, V.A. Radiações solar global e fração da global refletida em estufa tipo túnel em cobertura de polietileno. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 7., 1994, Vigo, Espanha. **Anais**. Vigo: ISES, 1994. v.1, p.53-58.
- FARIAS, J.R.B.; BERGAMASCIE, H.; MARTINS, S.R.; BERLATO, M.A. Efeito da cobertura plástica de estufa sobre a radiação solar. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, p.31-36, 1993a.
- FARIAS, J.R.B.; BERGAMASCIE, H.; MARTINS, S.R.; BERLATO, M.A.; OLIVEIRA, C.B. Alterações da temperatura e umidade relativa do ar provocadas pelo uso de estufa plástica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, p.51-62, 1993b.
- FARIAS, J.R.B.; BERGAMASCIE, H.; MARTINS, S.R. Evapotranspiração no interior de estufas plásticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.2, p.17-22, 1994.
- FIGUEIREDO, D.; FRISINA, V.A.; ESCOBEDO, J.F. Saldo de irradiância da cultura de alface numa estufa de polietileno. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9., 1995, Campina Grande. **Anais**. Campina Grande: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1995. p.329-331.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.3, p.403-410, 1991a.
- FONTANA, D.C.; BERLATO, M.A.; BERGAMASHI, H. Balanço de radiação em soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.3, p.411-418, 1991b.
- FRISINA, V.A. **Otimização de um albedômetro e aplicação no balanço de radiação e energia da cultura de alface (*Lactuca sativa*, L.) no interior e exterior de estufa de polietileno**. Botucatu: UNESP-FCA, 1998. 86p. Dissertação de Mestrado.
- FRISINA, V.A.; ESCOBEDO, J.F. Albedo no ciclo completo da cultura de alface. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE BIOMETEOROLOGIA, 1., 1995, Jaboticabal. **Anais**. Jaboticabal: Legis Summa, 1995. p.204-214.
- FRISINA, V.A.; ESCOBEDO, J.F.; ASSIS, S.V. Balanço de energia em cultura de alface (*Lactuca sativa*, L.) em estufa de polietileno. In: CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR, 8., 1997, Porto, Portugal. **Anais**. Porto: IESS, 1997. p.599-604.
- MARTINS, S.R.; FERNANDEZ GONZALEZ, J. Avaliação da temperatura interna de estufa plástica dotada com sistema de calefação por fluxo de ar quente. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.3, p.5-11, 1995a.

- MARTINS, S.R.; FERNANDEZ GONZALEZ, J. Avaliação do resfriamento em estufa plástica mediante sistema de ventilação e nebulização. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.3, p.13-18, 1995b.
- NASCIMENTO FILHO, M.F.; MOURA, M.A.L.; SOUZA, D.K.S.; BRAGA, M.B. Caracterização microclimática em diferentes estufas plásticas com hortaliças. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p.488-490.
- PEDRO JÚNIOR, M.J.; VILLA NOVA, N.A. Balanço de energia em soja (*Glycine max*, L. Merr.). **Turrialba**, v.31, n.4, p.309-312, 1981.
- PENMAN, H.L.; TANNER, C.B. Measurement of evapotranspiration. **Agronomy**, v.11, p.534-574, 1967.
- PEZZOPANE, J.E.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A.; MEYER, N. Radiação líquida e temperatura de folha no interior de estufa com cobertura plástica, durante o período noturno. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.3, p.1-4, 1995a.
- PEZZOPANE, J.E.M.; PEDRO JÚNIOR, M.J.; ORTOLANI, A.A. Modificações microclimáticas provocadas por estufa com cobertura plástica. **Bragantia**, v.54, n.2, p.419-425, 1995b.
- PRATES, J.E.; COELHO, D.T.; STEINMETZ, S.; SEDYAMA, G.C.; VIANELLO, R.L.V. Relação entre os componentes do balanço de energia em diferentes estádios de desenvolvimento do arroz (*Oryza sativa*, L.) de sequeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 5., 1987, Belém. **Anais**. Belém: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1987. p.333-336.
- RICIERI, R.P. **Transmissão da radiação solar global e difusa em estufas plásticas e nebulizadora**. Botucatu: UNESP-FCA, 1995. 91p. Dissertação de Mestrado.
- SCHNEIDER, F.M.; BURIOL, G.A.; ANDRIOLO, J.L.; ESTEFANEL, V.; STRECK, N.A. Modificação na temperatura do solo causada por estufas de polietileno transparente de baixa densidade em Santa Maria, RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.1, p.37-42, 1993.
- SENTELHAS, P.C.; VILLA NOVA, N.A.; ALGELOCCI, L.R. Efeito de diferentes tipos de cobertura em mini-estufas na atenuação da radiação solar e da luminosidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., 1997, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1997. p.479-481.
- SOUZA, J.L. **Saldo-radiômetro com termopilha de filme fino e aplicação no balanço de radiação e energia em cultivo de feijão-vagem (*Phaseolus vulgaris*, L.) com e sem cobertura de polietileno**. Botucatu: UNESP-FCA, 1996. 174p. Tese de Doutorado.
- SOUZA, J.L.; ESCOBEDO, J.F. Balanço de radiação em cultivos de feijão-vagem com e sem cobertura de polietileno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.1, p.1-15, 1997.
- STECK, N.A.; SCHNEIDER, F.M.; BURIOL, G.A. Aumento no aquecimento do solo solarizado com cobertura de túnel baixo e seu efeito sobre a produtividade de cenoura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.25-30, 1997.
- STECK, N.A.; SCHNEIDER, F.M.; BURIOL, G.A.; HELDWEIN, A.B. Efeito da cobertura com polietileno preto sobre o regime térmico de um solo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.4, n.1, p.15-20, 1996.
- WEBB, E.K. Aerial microclimate. **Meteorological Monographs**, v.6, p.27-58, 1965.