

**ALBEDÔMETRO COM TERMOPILHAS DE FILMES FINOS E APLICAÇÃO NA
DETERMINAÇÃO DO ALBEDO DA CULTURA DE ALFACE
(*Lactuca sativa*, L) EM ESTUFA DE POLIETILENO¹**

**ALBEDOMETER WITH THIN FILMS THERMOPILES AND ITS USE IN THE ALBEDO
DETERMINATION OF LETTUCE CULTURE INSIDE A
POLYETHYLENE GREENHOUSE**

Valéria de Almeida Frisina² e João Francisco Escobedo³

RESUMO

Este trabalho descreve a construção otimizada de um albedômetro e sua utilização em uma aplicação agrária, medindo as radiações global e refletida da cultura de alface em estufa de polietileno. O protótipo foi elaborado em estrutura metálica única de alumínio, contendo duas termopilhas de filmes finos tipo disco-concêntrico como sensores, cúpulas de vidro, conector elétrico, reservatório de sílica-gel e nível de bolha. A calibração (canal 1 - sensor da radiação global e canal 2 - sensor da radiação refletida) foi efetuada em área aberta, contra um piranômetro referência EPPLEY PSP, determinando-se o fator de calibração (K), variabilidade diária do fator de calibração (V), desvio de linearidade (DL) em função da densidade de fluxo e constante de tempo (τ). Os fatores de calibração determinados foram: $K_1 = (12,77 \pm 0,27) \mu V m^2/W$ e $K_2 = (15,20 \pm 0,29) \mu V m^2/W$; a variabilidade média diária obtida considerando todas as condições ambientais (cobertura do céu, temperatura e chuva) $V = 2\%$; o desvio de linearidade médio em função da densidade de fluxo entre 0 e $1000 W/m^2$ $DL = 1,46\%$; a constante de tempo $\tau = 8,62$ segundos e o tempo de resposta $T = 56$ segundos, para ambos os canais. Durante 42 dias do ciclo da alface, as determinações das

¹ Trabalho realizado com apoio Técnico da FAPESP (95/6952-3 e 95/7022-0) e do CNPq (302624/88-0).

² Pós-graduação em Agronomia - Energia na Agricultura, FCA, UNESP, Botucatu/SP.

³ Deptot. Ciências Ambientais, FCA, UNESP, Botucatu/SP/Brasil, CEP 18603-970; Caixa postal 237; TEL (014) 821-3883; FAX 014 821 3438.

radiações global e refletida, no interior da estufa de polietileno, demonstraram uma variação do albedo de 12%, no início do ciclo, e 27% na fase de colheita.

Palavras-chave: albedômetro, termopilhas, filmes finos, albedo, alface, estufa de polietileno.

SUMMARY

This paper describes aspects of building, optimization and calibration of an albedometer and its utilization in global and reflected radiation measurements during the lettuce crop cycle inside a polyethylene greenhouse. The prototype was developed in aluminium structure, with two thin films concentric-disc types thermopiles as sensors, glass domes, electrical connector, silica-gel reservoir and one level. The calibration (channel 1 - global radiation sensor and channel 2 - reflected radiation sensor) was made using the EPPLEY PSP pyranometer as the reference, and with determination of calibration factor (K), daily variability of the calibration factor (V), linearity deviation (DL) as function of flux density, time constant (τ) and time response (T). The calibration factors founded were: $K_1 = (12,77 \pm 0,27)\mu\text{V m}^2/\text{W}$ and $K_2 = (15,20 \pm 0,29)\mu\text{V m}^2/\text{W}$; the daily variability average obtained with all environments conditions (sky covered, temperature and rain) $V = 2\%$; linearity deviation as function of flux density, between 0 and $1000\text{W}/\text{m}^2$, $DL = 1,46\%$; time constant $\tau = 8,62$ seconds and time response $T = 56$ seconds to both channels. The albedometer measured global and reflected radiations, during 42 days of the lettuce cycle inside of a tunnel greenhouse with polyethylene cover. The global (R_G) and reflected (R_r) radiations (MJ/m^2) allowed an albedo variation between 12-15% in the beginning of the lettuce cycle and about 27% in lettuce harvesting.

Key words: albedometer, thin films thermopiles, albedo, lettuce, polyethylene greenhouse.

INTRODUÇÃO

O albedômetro é o radiômetro solar utilizado nas diversas áreas da agricultura para medir simultaneamente a radiação solar global (R_G) e a radiação refletida (rR_G) por uma superfície ou cultura. A partir das medidas das duas componentes, instantâneas ou integradas num intervalo de tempo, determina-se o albedo (A) e o balanço de radiação de ondas curtas da superfície.

A configuração básica de um albedômetro é similar à montagem de dois piranômetros - um voltado para cima, medindo a radiação solar global incidente e outro voltado para baixo, medindo a radiação refletida. Este método, no entanto, segundo ROBINSON (1966), está sujeito a fontes de erro referentes às diferenças da composição espectral da radiação solar global e da difusa, e das correntes térmicas e convectivas, internamente no instrumento. COULSON (1975) sugere que as medidas das duas componentes sejam feitas com apenas um piranômetro, alternando-se para cima e para baixo através de uma montagem móvel, pois os erros serão menos significantes em intervalos de tempo menores. Não existe um consenso da configuração ideal. Algumas indústrias que dominam o mercado de radiometria solar produzem o albedômetro como estrutura única - caso da KIPP-ZONEN, outras preferem a combinação de dois piranômetros, como por exemplo, a EPPLEY.

Considerando o elevado custo de importação deste detector solar, várias tentativas de desenvolvimento de albedômetros já foram realizadas no Brasil (SCHNEIDER et al, 1979; ENCARNAÇÃO et al, 1979), utilizando-se termopilhas obtidas pelo processo de eletrodeposição, porém nunca passaram da fase de protótipos. Recentemente, com a elaboração de uma metodologia de construção de termopilhas de filmes finos com técnicas fotolitográficas e evaporação de metais (ESCOBEDO, 1987), o desenvolvimento de radiômetros solares, no país, ganhou novo estímulo quanto à viabilidade de industrialização e desempenho, como mostram os trabalhos de LAGE (1991), DANTAS (1994), MELO (1993), SOUZA (1996) e ESCOBEDO (1997).

Dando seqüência ao projeto de radiometria solar com sensores termoelétricos de filmes finos, neste trabalho, são descritos os detalhes da otimização de um albedômetro, sua calibração, determinando-se o fator de calibração e sua dependência ambiental. Como teste de aplicabilidade, o equipamento foi utilizado nas medidas de radiação solar global e refletida, no ciclo da cultura de alface, com e sem cobertura de polietileno.

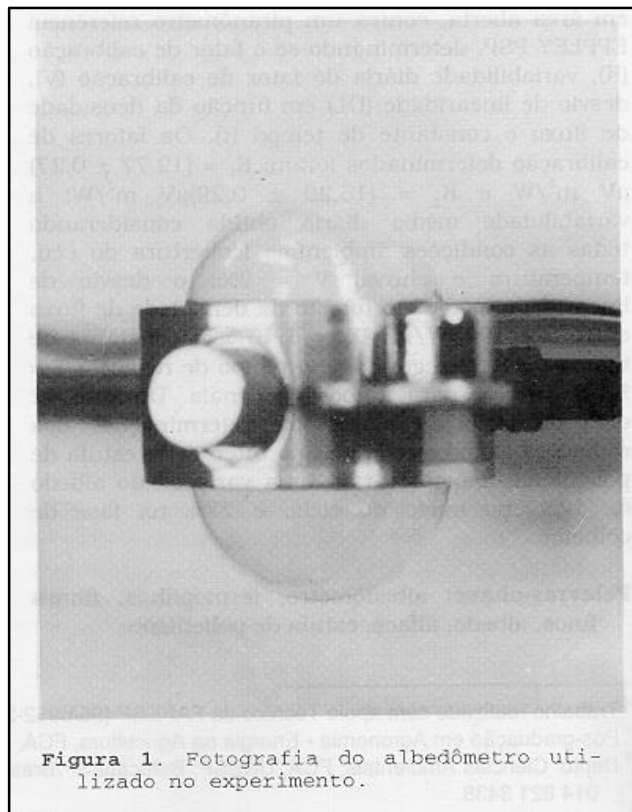
MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do Albedômetro

A Figura 1 mostra a fotografia do albedômetro, constituído de um corpo central, duas cúpulas de vidro, dois sensores de radiação, conector elétrico, extrator de calor, reservatório de sílica-gel e nível de bolha. O equipamento foi usinado integralmente em alumínio para minimizar peso, uma vez que sua utilização é de forma suspensa.

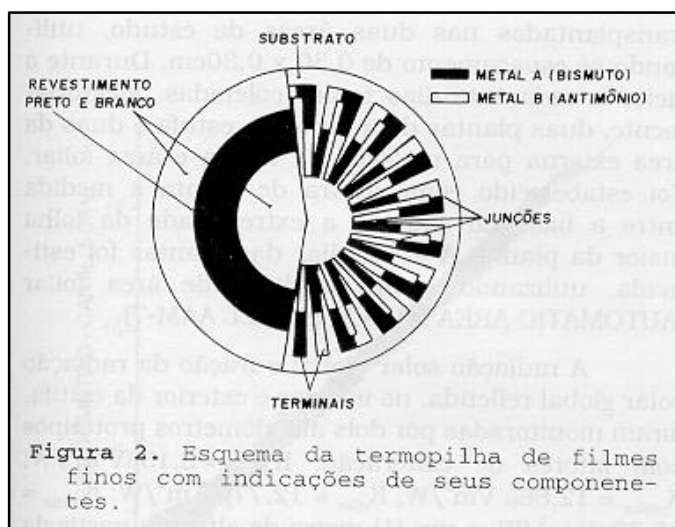
O sensor é composto por duas termopilhas de filmes finos, eletricamente independentes (32mm de diâmetro), posicionadas nas faces superior e inferior do aparelho. A termopilha superior

mede a radiação solar global e a inferior, a fração refletida da radiação solar global. As termopilhas são do tipo disco-concêntrico, elaboradas por processos fotolitográficos e evaporação dos metais



bismuto e antimônio (36 termopares), conforme metodologia descrita em ESCOBEDO (1987).

A Figura 2 mostra o esquema da termopilha de filmes finos, com as junções termoelétricas sob o revestimento preto e branco, depositados em substrato de acrílico.



O extrator de calor, fonte fria da termopilha, é o componente responsável pelo escoamento de calor do absorvedor para o ambiente. Quanto maior a condutividade térmica do metal, mais eficiente é a retirada de calor do absorvedor. O metal selecionado foi o alumínio pois, além de possuir condutividade térmica elevada, é de fácil usinagem, permitindo bom acabamento, a baixo custo.

As cúpulas de vidro têm a finalidade de proteger as termopilhas contra chuvas, ventos e umidade. Sua transmitividade média, conforme mostra a Figura 3, é de aproximadamente 90% para intervalo de comprimentos de onda entre 0,3 μm e 2,5 μm .

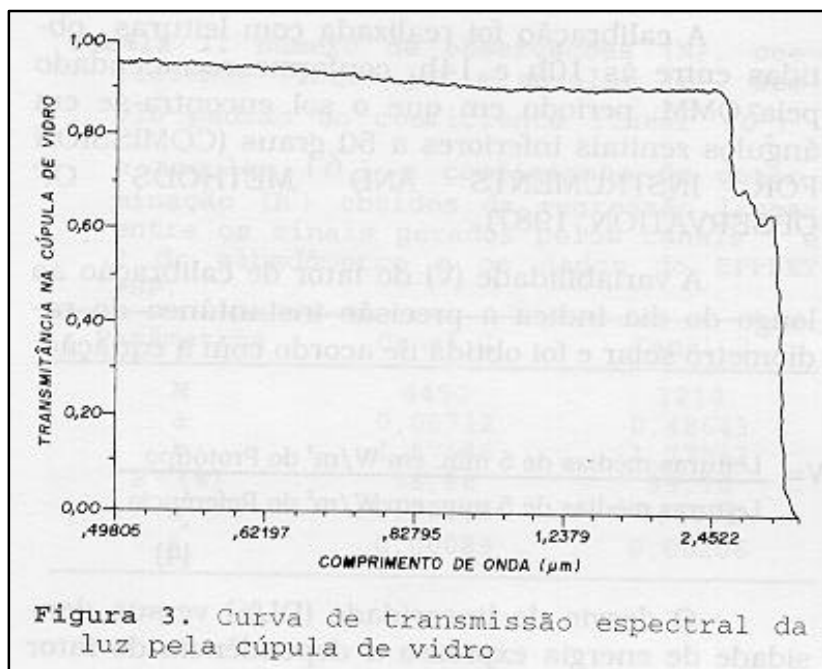
O conector elétrico consiste em uma peça metálica, na qual os fios elétricos são passantes. O conector é fixo ao corpo central, à base de pressão, por um parafuso de rosca soberba. Este sistema é mais eficiente contra a entrada de umidade que os conectores comerciais.

As tampas do albedômetro servem de suporte às termopilhas e têm função de facilitar o acesso ao interior do aparelho para limpeza, verificação das ligações das termopilhas.

O reservatório de sílica-gel tem a função de manter o ambiente interno do albedômetro livre de umidade. Foi fixado ao corpo central através de rosca e vedado à base de o'ring.

Calibração do Albedômetro

A calibração do albedômetro foi realizada mediante a determinação de seu fator de calibração (K), variabilidade diária (V), desvio de linearidade (DL) e constante de tempo (τ), no período de 28/08/96 à 25/09/96. O método de calibração utilizado foi o comparativo, de acordo com as recomendações da Organização Mundial de Meteorologia (OMM). Utilizou-se como instrumento referência um piranômetro EPPLEY modelo PSP, de uso restrito à aferição, com fator de calibração fornecido pela fábrica, igual a $K = 8,13\mu\text{V m}^2/\text{W}$.



O piranômetro EPPLEY PSP e o protótipo, instalados lado a lado no campo experimental, por um período de aproximadamente um mês, monitoraram a radiação solar global em condições naturais de irradiância e fatores ambientais. Posteriormente, o albedômetro foi invertido e calibrou-se o canal 2 (termopilha inferior), de forma similar ao canal 1.

Os fatores de calibração do albedômetro (canal 1 e canal 2) foram calculados por dois métodos: método da média e da regressão linear. No primeiro, os fatores de calibração foram obtidos através da média dos valores individuais dos fatores de calibração sobre todas as observações, segundo as equações:

$$K_p = [1/N] \sum_{i=1}^n K_i \quad (1)$$

e

$$K_i = \left[\frac{V_p}{V_{ref.}} \right] K_{ref.} \quad (2)$$

onde K_p e K_{ref} são fatores de calibração do protótipo e referência, respectivamente, e V_p e V_{ref} são sinais em Volts, gerados pelos dois radiômetros simultaneamente.

No segundo método, os fatores de calibração foram calculados segundo equações de regressão linear, geradas com as leituras (em mV) do piranômetro referência e albedômetro protótipo:

$$K_p = (a + \delta_a) + (b + \delta_b) \times K_{ref} \quad (3)$$

onde K_p e K_{ref} são os fatores de calibração do protótipo e piranômetro referência, respectivamente; o termo $(a + \delta_a)$ é o fator de interceptação e seu respectivo desvio; $(b + \delta_b)$ é o coeficiente angular e desvio da curva de regressão, respectivamente.

A calibração foi realizada com leituras obtidas entre às 10h e 14h, conforme recomendado pela OMM, período em que o sol encontra-se em ângulos zenitais inferiores a 50 graus (COMMISSION FOR INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION, 1987).

A variabilidade (V) do fator de calibração ao longo do dia indica a precisão instantânea do radiômetro solar e foi obtida de acordo com a equação:

$$V = \frac{\text{Leituras médias de 5 min. em W/m}^2 \text{ do Protótipo}}{\text{Leituras médias de 5 min. em W/m}^2 \text{ do Referência}} \quad (4)$$

O desvio de linearidade (DL%) versus densidade de energia expressa a dependência do fator de calibração com os níveis de radiação, onde A é a leitura do Eppley PSP e B é a leitura do protótipo, em W/m²:

$$DL (\%) = [(A - B) / A] \times 100 \quad (5)$$

A constante de tempo (τ) caracteriza a velocidade de resposta do aparelho e é definida como o tempo necessário para que o sensor atinja 63,2% do valor de equilíbrio térmico para o estímulo luminoso na fase de aquecimento ou 36,8% do valor de equilíbrio na fase de resfriamento. O tempo de resposta (T) representa o tempo de estabilidade do sinal gerado para uma densidade de fluxo.

Para a determinação da constante de tempo, o albedômetro (canal 1 e canal 2, um por vez) foi submetido a estímulos luminosos que produziram curvas de aquecimento e, em seguida, curvas de resfriamento. As curvas de aquecimento foram obtidas expondo-se o aparelho a um estímulo de luz, a partir da milivoltagem zero até ser atingido o equilíbrio térmico. Para se obter as curvas de resfriamento, o estímulo luminoso foi bloqueado integralmente a partir do equilíbrio térmico até ser atingida a milivoltagem zero.

Determinação do albedo da alface cultivada no interior e exterior da estufa de polietileno

O monitoramento do albedo da alface foi realizado no período de 27/09/96 à 11/11/96, durante o ciclo da cultura, no interior da estufa e em uma área externa, ambas com 35m². A estufa utilizada foi uma estufa tipo túnel com cobertura de polietileno (100 μ m), com as seguintes dimensões: 7m de comprimento, 5m de largura, 2m de altura do pé direito e 1,7m de altura da concavidade do arco.

Foi utilizada alface (*Lactuca sativa*, L) variedade Verônica. A semeadura foi realizada em bandejas de isopor e o substrato adubado com nitrato de amônio e nitrato de potássio e, posteriormente, transplantadas nas duas áreas de estudo, utilizando-se espaçamento de 0,30 x 0,30cm. Durante o ciclo, a cada sete dias foram coletadas, aleatoriamente, duas plantas do interior da estufa e duas da área externa para medição da altura e área foliar. Foi estabelecido como altura de planta a medida entre a base do caule e a extremidade da folha maior da planta. A área foliar das plantas foi estimada, utilizando-se um medidor de área foliar (AUTOMATIC AREA METER MODEL AAM-7).

A radiação solar global e fração da radiação solar global refletida, no interior e exterior da estufa, foram monitoradas por dois albedômetros protótipos com fatores de calibração: K_{rGex}

= 8,13 μ V m²/W; K_{rRGex} = 12,86 μ Vm²/W; K_{rGin} = 12,77 μ V m²/W; K_{rRGin} = 15,20 μ V m²/W, a um (1) metro de altura a partir da superfície do solo.

Aquisição de Dados

Nos ensaios da calibração e aplicação, foi utilizado um sistema de aquisição de dados constituído de um DATALOGGER 21 X, da CAMPBELL, de oito canais, interligado a uma placa MULTIPLEX AM 416, de 32 canais e a um microcomputador 486 DX2. 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, através de uma interface SC 32A. O DATALOGGER operou na frequência de 1Hz, captando uma leitura por segundo e armazenando médias de cinco minutos ou 300 leituras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do Albedômetro

Nos gráficos da Figura 4 estão representados os sinais (em milivolts) gerados pelos canais 1 e 2 do albedômetro protótipo e piranômetro padrão EPPLEY PSP, durante todos os dias do período de calibração. Resultaram num total de 2210 pontos experimentais para o canal 1 e 4450 para o canal 2.

Tabela 1. Número de observações (N), coeficiente linear (a) e angular (b), desvio padrão do coeficiente linear (δ_a) e angular (δ_b) e coeficiente de determinação (R^2) obtidos da regressão linear entre os sinais gerados pelos canais 1 e 2 do albedômetro e os dados do EPPLEY PSP.

Parâmetros	Canal 1	Canal 2
N	4450	2210
a	0,00712	0,48643
b	1,57586	1,77913
R^2 (%)	98,58	99,70
δ_a	0,00338	0,0091
δ_b	0,00089	0,00206

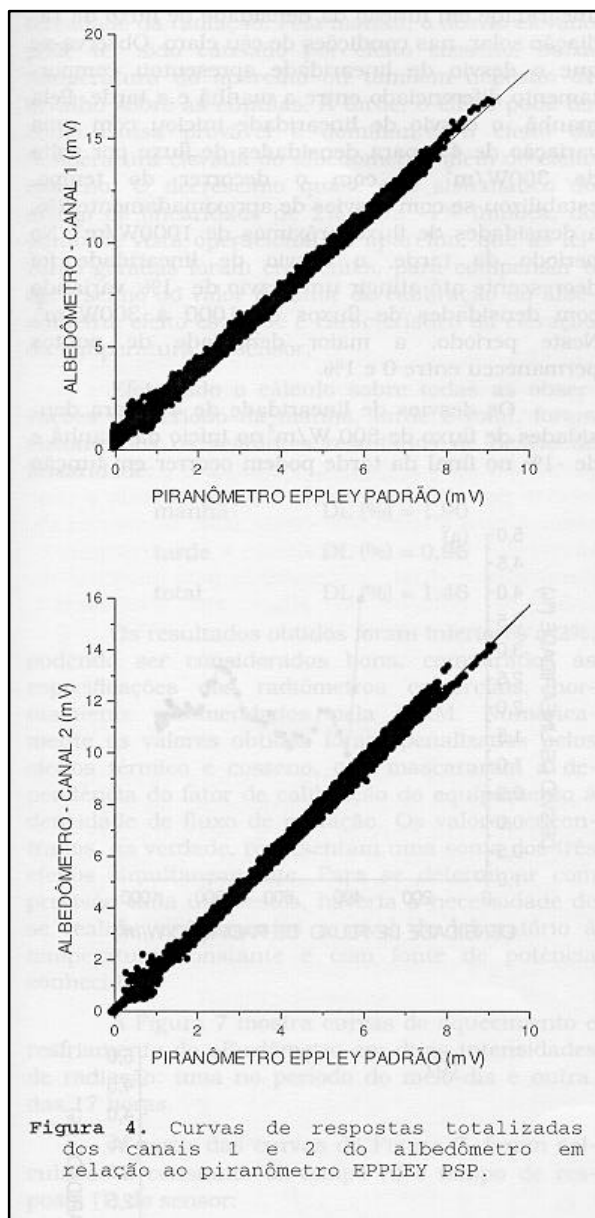


Tabela 1 apresenta os resultados da regressão linear entre os sinais gerados pelos canais 1 e 2 do albedômetro e aqueles observados no EPPLEY PSP. Em função dos elevados valores dos coeficientes de determinação (R^2), próximos de 100%, pode-se concluir que as curvas de regressão linear estão bem ajustadas aos dados experimentais.

Os valores dos fatores de calibração e respectivos desvios, obtidos pelo método da regressão linear foram:

$$K_{1'} = (12,82 \pm 0,01) \mu\text{V m}^2/\text{W}$$

$$K_{2'} = (14,95 \pm 0,03) \mu\text{V m}^2/\text{W}$$

e pelo método das médias:

$$K_1 = (12,77 \pm 0,27) \mu\text{V m}^2/\text{W}$$

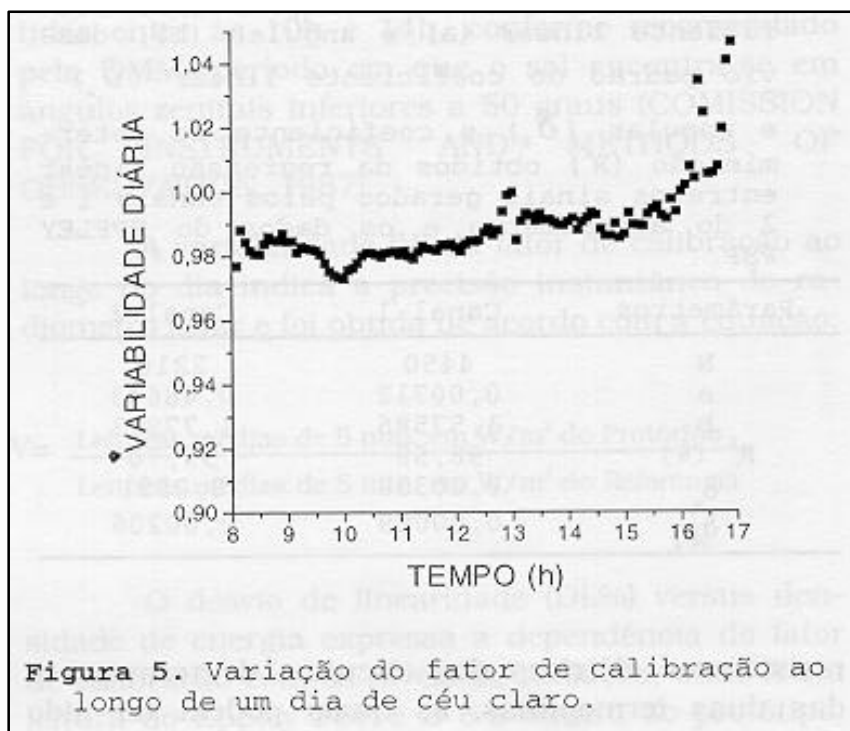
$$K_2 = (15,20 \pm 0,29) \mu\text{V m}^2/\text{W}$$

A diferença observada entre os valores dos fatores de calibração do canal 1 e canal 2 é devido à diferença de sensibilidade das duas termopilhas, mesmo sendo ambas do mesmo tipo, área e número de termopares. Tal efeito deve-se às diferentes resistências elétricas dos circuitos de termopares das duas termopilhas, as quais podem ter sido obtidas em lotes de evaporações distintos, ocasionando depósitos de diferentes espessuras. Esta diferença nos valores de sensibilidade não acarreta nenhum prejuízo no desempenho do albedômetro, uma vez que as termopilhas são independentes eletricamente e ainda encontram-se dentro de uma faixa normal de operação.

Comparando os valores dos fatores de calibração $K_1 = (12,82 \pm 0,01)\mu\text{V m}^2/\text{W}$ e $K_2 = (14,95 \pm 0,03)\mu\text{V m}^2/\text{W}$ obtidos pelo método da regressão linear com os obtidos pelo método das médias $K_1 = (12,77 \pm 0,27)\mu\text{V m}^2/\text{W}$ e $K_2 = (15,20 \pm 0,29)\mu\text{V m}^2/\text{W}$, observa-se uma ligeira variação nos valores da sensibilidade. No entanto, considerando os limites estabelecidos pelos desvios padrão, estatisticamente são iguais, demonstrando que o fator de calibração de um radiômetro solar, determinado pelo método comparativo, pode ser calculado tanto pelo método das médias como pelo método estatístico de regressão linear.

Os desvios dos fatores de calibração de 0,27 e 0,29 para os canais 1 e 2 correspondem a uma variação de 2,1% e 1,91%, respectivamente. Estes resultados podem ser considerados normais, comparados aos obtidos com piranômetros que utilizam termopilhas de filmes finos (ESCOBEDO, 1997) e aos radiômetros solares recomendados pela OMM, que considera como limite máximo de variação 2%. Assim, de acordo com esse parâmetro, o albedômetro seria classificado como um instrumento de classe 2, podendo ser utilizado rotineiramente como instrumento de boa precisão. A ordem de grandeza dos desvios do albedômetro protótipo é similar a de albedômetro produzido pela KIPP-ZONEN e do albedômetro constituído por dois piranômetros BLACK-WHITE da EPPLEY.

A Figura 5 mostra a curva da variação do fator de calibração ao longo de um dia de céu claro, de forma normalizada. Quanto mais próximos de 1 os valores de variabilidade diária, menor é a variação do fator de calibração ao longo do dia.

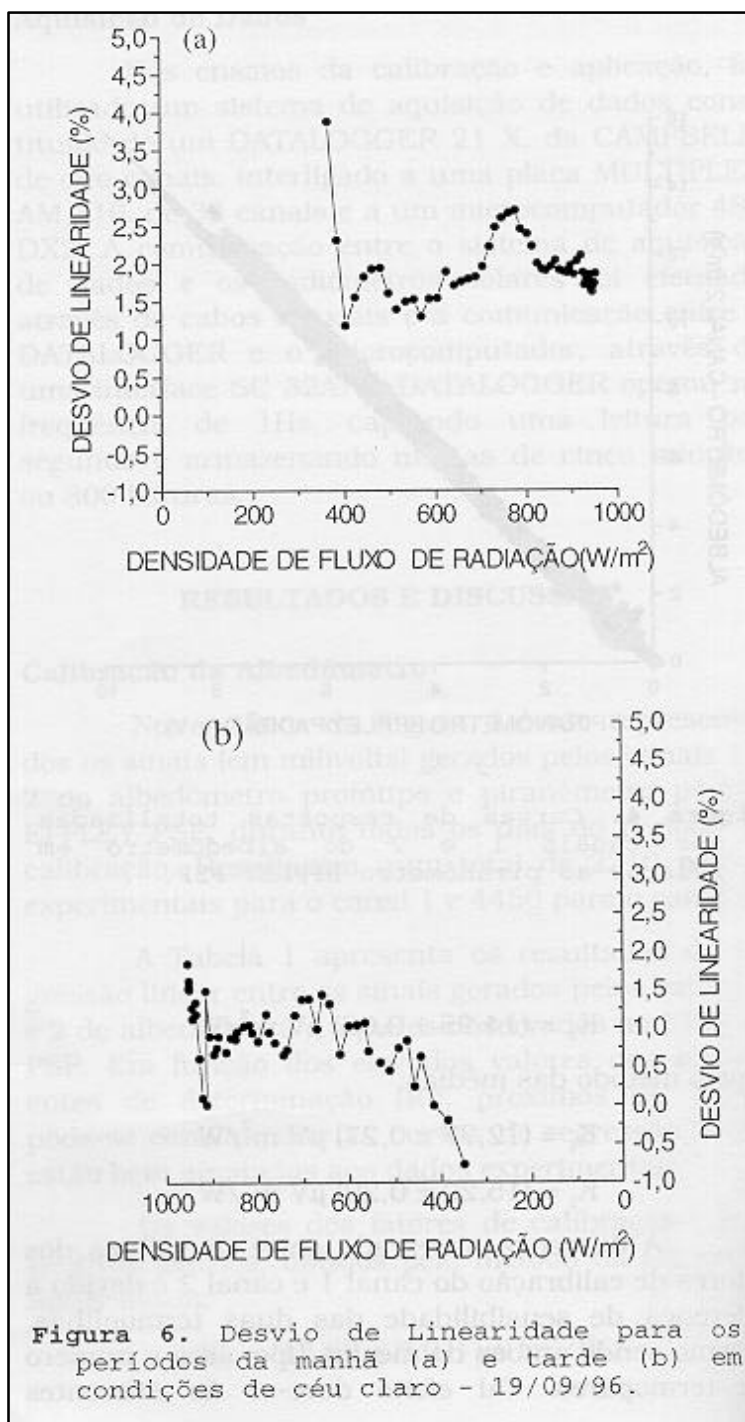


Em dia de céu claro, a variabilidade do fator de calibração calculado entre 8 e 17 horas apresentou limites de variação entre 0,98 e 1,05, correspondendo a um intervalo de - 3% à 5%. Os limites inferiores próximos de -3% ocorreram provavelmente em função da umidade da cúpula e resfriamento do corpo metálico do aparelho, o que é normal quando este permanece instalado no campo experimental durante à noite. Entre 8 e 12 horas, o fator de calibração oscilou de 0,98 a 0,99, ou seja de 2% a 1%; entre 12 e 16h30min permaneceu de 0,99 a 1,0, ou seja de 1% a 0% e depois das 16h30min teve um rápido crescimento, atingindo um patamar de 1,05 ou variação de 5%. O intervalo entre 8 e 16h30min (2% a 0%) está dentro da própria variação de imprecisão do albedômetro, portanto o resultado é satisfatório e coerente com o desvio do fator de calibração. Após as 16h30min, o fator de calibração se afastou do valor original em mais de 3%. A causa provável deste desvio não deve ser creditada somente a possíveis efeitos de temperatura no aparelho pois, neste caso, ocorreria afastamento progressivo e lento dos pontos na curva. O crescimento brusco, que pode ter sido provocado por efeitos de reflexão da luz solar em qualquer um dos aparelhos, visto que, no final da tarde, o campo experimental sofria interferências devido à proximidade de prédios e árvores.

Segundo metodologia da ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (1981), na aferição da variabilidade do fator de calibração de um instrumento, deve-se considerar a variação

diária média. Assim, efetuando-se a média das 109 observações, encontrou-se o valor $V = 0,98$. Este resultado é consistente, encontrando-se dentro dos limites do desvio padrão obtido na calibração.

A Figura 6 mostra as curvas dos desvios de linearidade em função da densidade de fluxo da radiação solar, nas condições de céu claro. Observa-se que o desvio de linearidade apresentou comportamento diferenciado entre a manhã e a tarde. Pela manhã, o desvio de linearidade iniciou



com uma variação de 4% para densidades de fluxo por volta de $300W/m^2$ e, com o decorrer do tempo, estabilizou-se com desvios de aproximadamente 2%, a densidades de fluxo próximos de $1000W/m^2$. No período da tarde, o desvio de linearidade foi decrescente até atingir um desvio de -

1%, variando com densidades de fluxos de 1000 à 300W/m². Neste período, a maior densidade de pontos permaneceu entre 0 e 1%.

Os desvios de linearidade de 4% para densidades de fluxo de 300 W/m² no início da manhã e de -1% no final da tarde podem ocorrer em função de problemas ambientais, não dependentes da intensidade da radiação. Pela manhã, o desvio elevado pode ter sido causado por efeito cosseno, baixa temperatura do aparelho ou também depósito de orvalho sobre as cúpulas. À tarde, o efeito pode ter como causa provável e dominante, o efeito da temperatura elevada do albedômetro, além do efeito cosseno. O decréscimo quase que sistemático do desvio de linearidade de 2% para -1% implica, do ponto de vista operacional do aparelho, que as leituras geradas foram crescentes, para compensar o decréscimo do valor do fator de calibração do albedômetro, efeito este que é característico da elevação da temperatura do sensor.

Efetuada o cálculo sobre todas as observações no período da manhã, tarde e total, foram encontrados os seguintes resultados de desvio de linearidade:

manhã	DL (%) = 1,90
tarde	DL (%) = 0,96
total	DL (%) = 1,46

Os resultados obtidos foram inferiores a 2%, podendo ser considerados bons, comparados às especificações dos radiômetros comerciais, normalmente recomendados pela OMM. Numericamente os valores obtidos foram penalizados pelos efeitos térmico e cosseno, que mascararam a dependência do fator de calibração do equipamento à densidade de fluxo de radiação. Os valores encontrados, na verdade, representam uma soma dos três efeitos simultaneamente. Para se determinar com precisão cada um destes, haveria a necessidade de se realizar experimentos a nível de laboratório à temperatura constante e com fonte de potência conhecida.

A Figura 7 mostra curvas de aquecimento e resfriamento do albedômetro em duas intensidades de radiação: uma no período do meio-dia e outra, das 17 horas.

A partir das curvas da Figura 7, foram calculados a constante de tempo (τ) e tempo de resposta (T) do sensor:

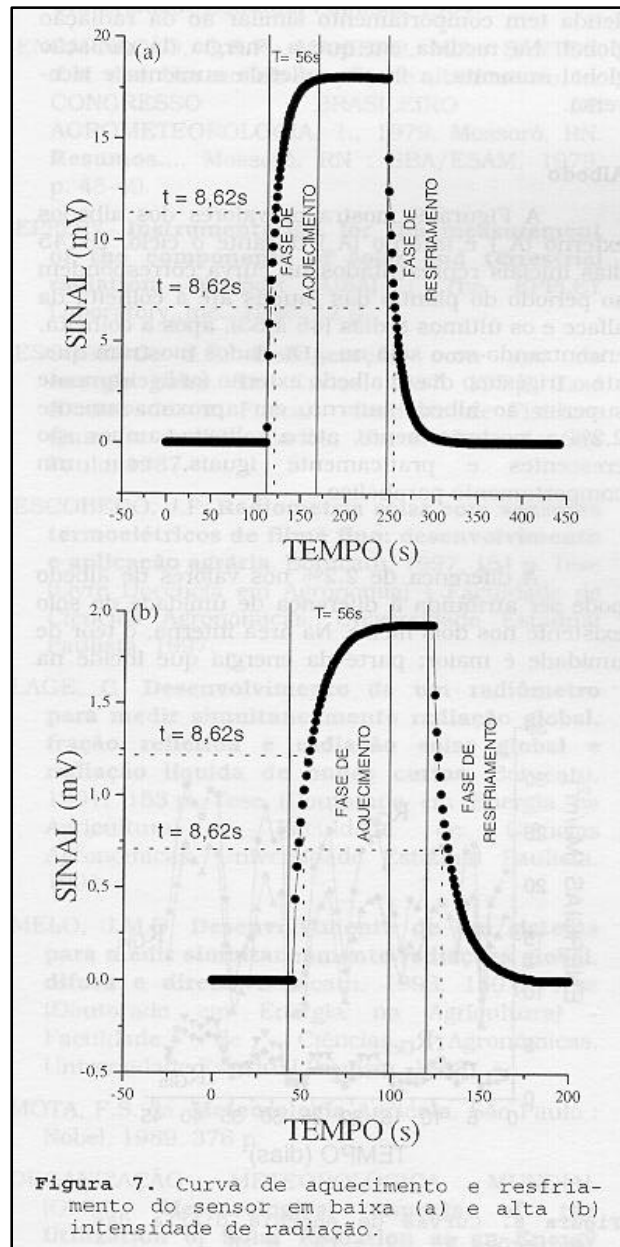
Em alta densidade de fluxo:

$$\tau_a = 8,62 \text{ s}; \quad T = 56 \text{ s} \quad \tau_r = 8,62 \text{ s}$$

Em baixa densidade de fluxo:

$$\tau_a = 8,62 \text{ s}; \quad T = 56 \text{ s} \quad \tau_r = 8,62 \text{ s}$$

Os valores simétricos das constantes de tempo na fase de aquecimento e de resfriamento demonstraram que o balanço de energia se estabelece de forma similar, tanto quando o sensor do albedômetro recebe energia como quando perde, independente da intensidade de radiação. Esta característica é fundamental para que o albedômetro responda linearmente em função da densidade de fluxo após horas de medição, como é o caso dos radiômetros solares.

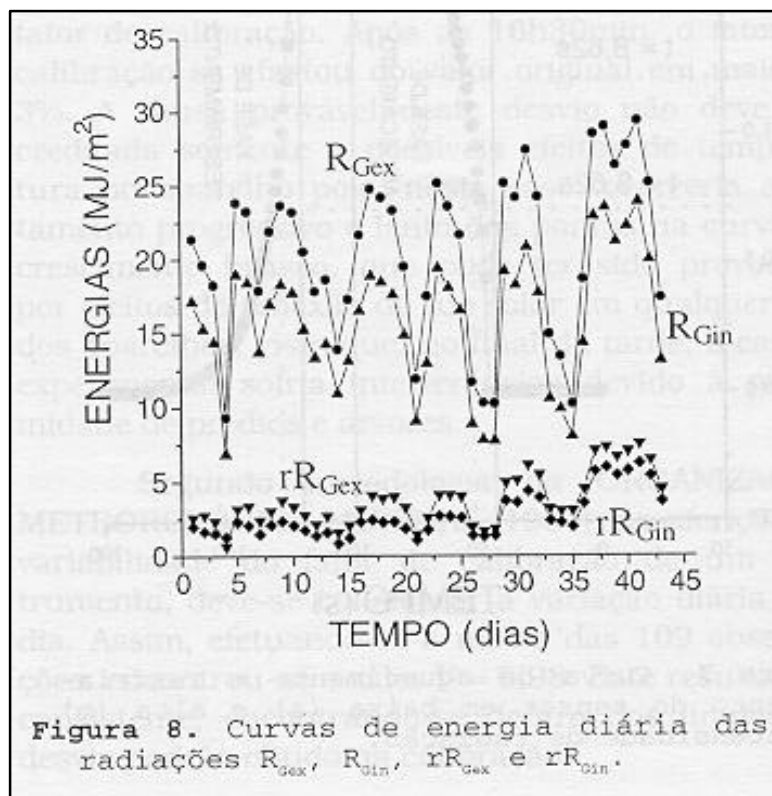


Comparando os valores das constantes de tempo (8,62 segundos) e tempo de resposta (56 segundos) do protótipo com os de radiômetros importados, pode-se considerar o albedômetro dentro de limites satisfatórios. Apesar de apresentar valores de τ e T ligeiramente mais elevados que

os de instrumentos da EPPLEY e KIPP-ZONEN. Numericamente, os resultados obtidos enquadram-se dentro dos limites estabelecidos pela OMM, que é de, no máximo, 30 segundos.

Radiação Solar Global e Refletida no interior da estufa e área aberta

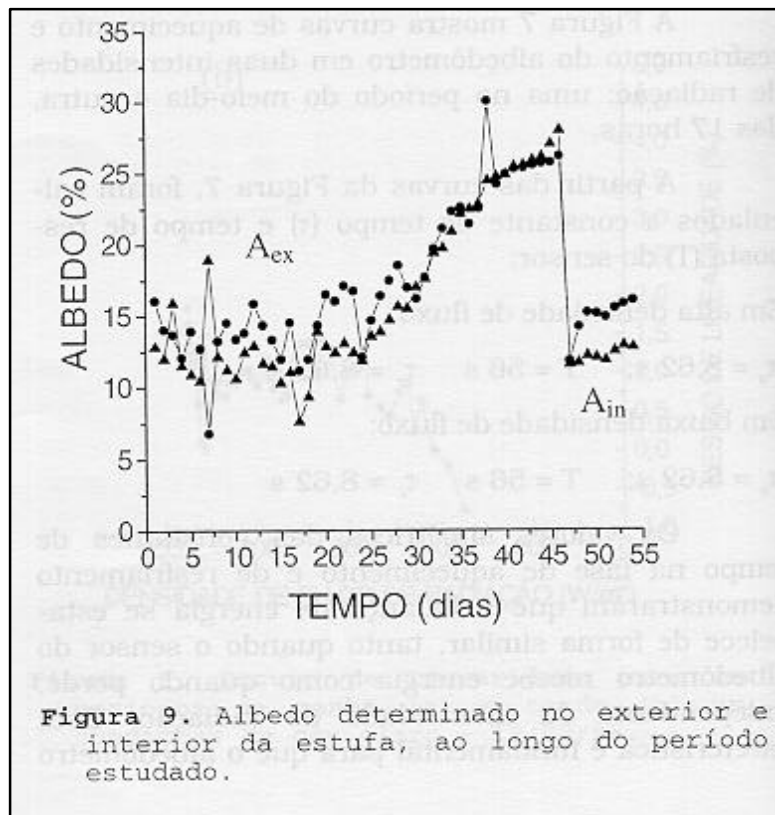
A Figura 8 mostra as curvas de energias diárias (MJ/m^2) das radiações solares global no exterior (R_{Gex}) e interior (R_{Gin}) e refletidas no exterior (rR_{Gex}) e interior (rR_{Gin}) da estufa, ao longo do ciclo da cultura. As irradiâncias variaram em amplo intervalo de energia: radiação global externa de $7,27\text{MJ}/\text{m}^2$ à $29,38\text{MJ}/\text{m}^2$; global interna, de $5,59\text{MJ}/\text{m}^2$ à $23,85\text{MJ}/\text{m}^2$; refletida externa, de $0,63\text{MJ}/\text{m}^2$ à $7,53\text{MJ}/\text{m}^2$ e fração da global refletida interna, de $0,67\text{MJ}/\text{m}^2$ à $6,22\text{MJ}/\text{m}^2$. Ao longo do tempo, é possível observar que a radiação solar refletida tem comportamento similar ao da radiação global. Na medida em que a energia da radiação global aumenta, a fração refletida aumenta e vice-verso.



Albedo

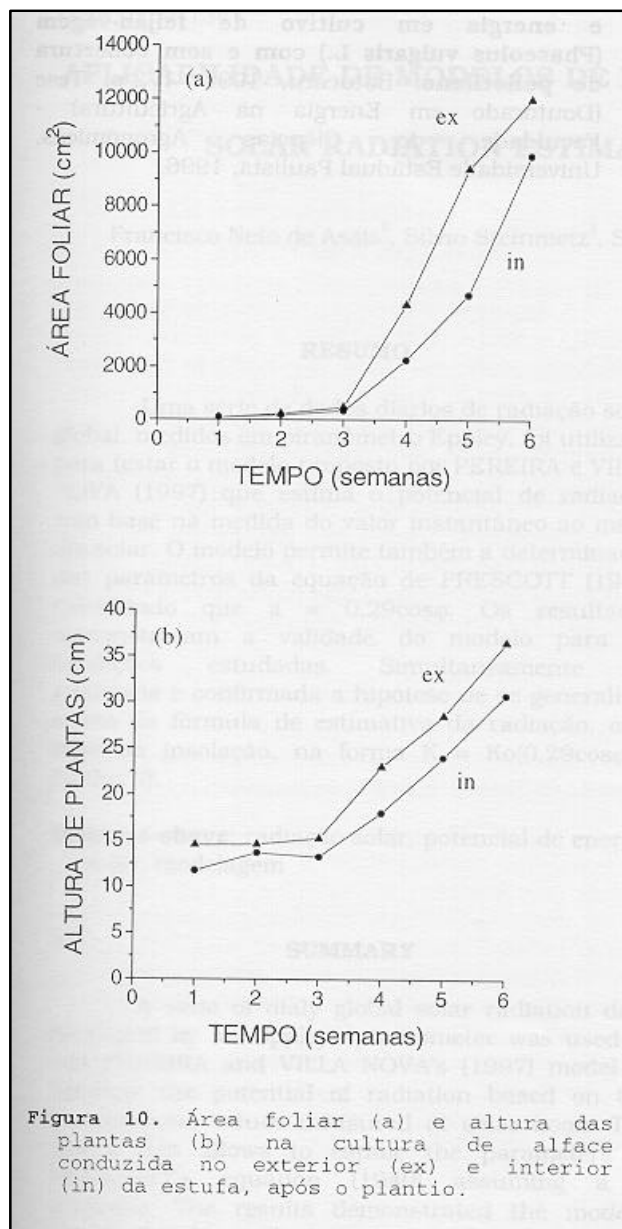
A Figura 9 mostra os valores dos albedos externo (A_{ex}) e interno (A_{in}) durante o ciclo. Os 45 dias iniciais representados na curva correspondem ao período do plantio das mudas até a colheita da alface e os últimos 8 dias (45 à 53), após a colheita, encontrando-se o solo nu. Os dados mostram que, até o trigésimo dia, o albedo externo foi ligeiramente superior ao albedo interno, em

aproximadamente 2,2% e, posteriormente, até a colheita, ambos são crescentes e praticamente iguais, com um comportamento parabólico.



A diferença de 2,2% nos valores de albedo pode ser atribuída à diferença de umidade do solo existente nos dois meios. Na área interna, o teor de umidade é maior; parte da energia que incide na forma de radiação é convertida em calor latente de evaporação e, portanto, o percentual de radiação refletida é menor. Este efeito já foi descrito por vários pesquisadores. Beletskyt (1965) citado por MOTA (1989) estudou o efeito da umidade no albedo de superfícies refletoras, observando que, em condições de seca, o valor do albedo foi maior.

Na primeira fase do ciclo, até por volta do vigésimo dia, os valores de albedo externo e interno situaram-se na faixa de 12% e 15%, respectivamente. Neste período, em ambos os ambientes, a cultura estava em pleno desenvolvimento, no entanto, o substrato dominante na reflexão era o solo. Isto foi verificado numericamente através dos valores de albedo antes do plantio e após a colheita (nos 8 dias finais), em que o solo encontrava-se descoberto sem a cultura. A partir do vigésimo quinto dia após o plantio, o substrato passou a ser coberto por uma área foliar mais acentuada e com maior altura (Figura 10). Nesta fase, os valores do albedo dos dois meios tenderam a um crescimento simultâneo e igual, caracterizado pelo aumento do poder de reflexão da alface em crescimento, atingindo um limite de 27%.



CONCLUSÕES

A partir das características operacionais obtidas na calibração do albedômetro: fator de calibração ($K_1 = 12,77\mu V m^2/W$ e $K_2 = 15,20\mu V m^2/W$); variabilidade diária ($V = 2,0\%$); desvio de linearidade em função da densidade de fluxo ($DL = 1,46\%$) e constante de tempo ($\tau = 8,62s$), o protótipo, segundo os critérios de classificação da OMM, é de classe 2, podendo ser utilizado continuamente com precisão de 2%.

As irradiâncias global e refletida no interior da estufa apresentam comportamentos similares aos da radiação solar global interna e externa. Ao longo do ciclo da alface, o albedo aumentou quase que linearmente devido ao aumento de área foliar da cultura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COMISSION FOR INSTRUMENTS AND METHODS OF OBSERVATION. **Primera Comparación Regional de la O.M.M. de Pyrheliometros Patrones Nacionales de la A.R.** Buenos Aires : Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina, 1987, 41 p. (Informe Final, 3).
- COULSON, K.L. **Solar and terrestrial radiation: Methods and Measurements.** New York : Academic Press, 1975. 322 p.
- DANTAS, A.A.A. **Radiômetro solar para meio aquoso e relações entre radiações global, refletida e transmitida.** Botucatu, 1994, 139 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1994.
- ENCARNAÇÃO, C.R.F.; MANIERO, M.A.; SANTOS, J.M. dos. Um modelo simples de albedômetro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró, RN. **Resumos...**, Mossoró, RN : SBA/ESAM, 1979, p. 48-49.
- EPPLEY. **Instrumentation for the measurement of the components of solar and terrestrial radiation.** Newport (USA) : The EPPLEY Laboratory, Inc., 1990. 12 p.
- ESCOBEDO, J.F. **Refrigeração com uso de energia solar.** São Carlos, 1987, 195 p. Tese (Doutorado em Física) - Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1987.
- ESCOBEDO, J.F. **Radiometria solar com sensores termoeletricos de filme fino: desenvolvimento e aplicação agrária.** Botucatu, 1997, 151 p. Tese (Livre Docência em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1997.
- LAGE, G. **Desenvolvimento de um radiômetro para medir simultaneamente radiação global, fração refletida e radiação solar global e radiação líquida de ondas curtas.** Botucatu, 1991. 153 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1991.
- MELO, J.M.D. **Desenvolvimento de um sistema para medir simultaneamente radiações global, difusa e direta.** Botucatu, 1993. 130 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, 1993.

MOTA, F.S. da. **Meteorologia Agrícola**. São Paulo : Nobel, 1989. 376 p.

ORGANIZAÇÃO METEOROLÓGICA MUNDIAL (OMM). **Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source**. Geneva : World Meteorological Organization, 1981, 298 p. (Technical Note, 172).

ROBINSON, N. **Solar radiation**. New York : Elsevier, 1966. 347 p.

SCHNEIDER, F.M., MATA, G.J., SANTOS, J.M. Estudo preliminar de um albedômetro com referencial zero. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 1., 1979, Mossoró, RN. **Resumos...**, Mossoró, RN : SBA/ESMA, 1979, p. 54-55.

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, 1996. 172 p. Tese (Doutorado em Energia na Agricultura) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, 1996.