Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology

OPEN ACCESS

DOI: 10.5380/abclima

SALDO DE RADIAÇÃO EM ESTUFA DE POLIETILENO

NET RADIATION IN POLYETHYLENE GREENHOUSE

BALANCE DE RADIACIÓN EN INVERNADERO DE POLIETILENO

Lucas Carvalho Lenz
Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/Botucatu
lenzchacal@gmail.com

Enzo Dal Pai
Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/Botucatu
enzo-dal.pai@unesp.br

João Francisco Escobedo
Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/Botucatu
j.escobedo@unesp.br

Alexandre Dal Pai
Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP/Botucatu
dal.pai@unesp.br

Resumo: O trabalho descreve uma análise climática e estatística do Balanço de Radiação em estufa de polietileno tipo túnel. O balanço de radiação é a soma das radiações de ondas curtas (Global e refletida) com as radiações de ondas longas (atmosférica e terrestre). As medidas no interior da estufa foram feitas no período de 01/03/2008 a 28/02/2009 e as medidas no exterior foram realizadas no período de 01/03/2011 a 28/02/2012, no campus da FCA, UNESP de Botucatu. As quatro radiações apresentam variações sazonais ao longo do ano: os valores médios mensais das radiações são maiores no período chuvoso, verão e primavera, nos quais são maiores as concentrações de nuvens e vapor de água, e menores no outono e inverno, no período da seca, onde são menores as concentrações de nuvens e vapor de água. O valor médio-anual do balanço de ondas curtas no interior da estufa foi de 11,2 $MJm^{-2}dia^{-1}$ e no exterior foi de 15,0 $MJm^{-2}dia^{-1}$, o valor médio-anual do balanço de ondas longas no interior da estufa foi de -3,8 $MJm^{-2}dia^{-1}$ e de -5,7 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no exterior e o valor médio-anual do Saldo de Radiação no interior da estufa foi de 7,4 $MJm^{-2}dia^{-1}$ e de 9,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no exterior.
Palavras-chave: Balanço de radiação. Radiação termal. Radiação de ondas longas. Radiação de ondas curta.

Abstract: The work describes a climatic and statistical analysis of the Radiation Balance in a tunnel type polyethylene greenhouse. The radiation balance is the sum of short wave radiation (Global and

reflected) with long wave radiation (atmospheric and terrestrial). The measurements inside the greenhouse were made from 01/03/2008 to 02/28/2009 and the measurements outdoors were carried out from 01/03/2011 to 02/28/2012, at the FCA campus, UNESP Botucatu. The four radiations show seasonal variations throughout the year: the average monthly radiation values are higher in the rainy season, summer and spring, in which the concentrations of clouds and water vapor are higher, and lower in autumn and winter, in the period of drought, where cloud and water vapor concentrations are lower. The average annual value of the short wave balance inside the greenhouse was 11.2 $MJm^{-2}dia^{-1}$ and outside it was 15.0 $MJm^{-2}dia^{-1}$, the average annual value of the long wave balance inside the greenhouse was -3.8 $MJm^{-2}dia^{-1}$ and -5.7 $MJm^{-2}dia^{-1}$ outside and the average annual value of the radiation balance inside the greenhouse was 7.4 $MJm^{-2}dia^{-1}$ and 9.3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ outside.
Keywords: Net radiation. Thermal radiation. Long wave radiation. Shortwave radiation.

Resumen: El trabajo describe un análisis climático y estadístico del Balance de Radiación en un invernadero de polietileno de tipo túnel. El balance de radiación es la suma de la radiación de onda corta (global y reflejada) con radiación de onda larga (atmosférica y terrestre). Las mediciones en el interior del invernadero se realizaron del 01/03/2008 al 28/02/2009 y las mediciones en el exterior se llevaron a cabo del 01/03/2011 al 28/02/2012, en el campus de la FCA, UNESP Botucatu. Las cuatro radiaciones muestran variaciones estacionales a lo largo del año: los valores de radiación mensuales promedio son más altos en la temporada de lluvias, verano y primavera, en las que las concentraciones de nubes y vapor de agua son más altas, y más bajas en otoño e invierno, en el período de sequía, donde las concentraciones de nubes y vapor de agua son más bajas. El valor promedio anual del balance de onda corta dentro del invernadero fue de 11.2 $MJm^{-2}dia^{-1}$ y fuera de 15.0 $MJm^{-2}dia^{-1}$, el valor promedio anual del balance de onda larga dentro del invernadero fue de -3.8 $MJm^{-2}dia^{-1}$ y -5.7 $MJm^{-2}dia^{-1}$ afuera y el valor promedio anual del balance de radiación dentro del invernadero fue de 7.4 $MJm^{-2}dia^{-1}$ y 9.3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ afuera.
Palabras-clave: Balance de radiación. Radiación termal. Radiación de onda larga. Radiación de onda corta

Submetido em: 03/03/2020
Aceito para publicação em: 18/08/2021
Publicado em: 22/09/2021

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o cultivo em estufas de polietileno aumentou consideravelmente em muitos países como um meio de proteção de plantas e culturas agronômicas contra adversidades e variações climáticas (ANDRADE et al., 2011). A grande vantagem dessa técnica é a possibilidade de produção, principalmente de hortaliças e flores, nos períodos de entressafra, garantindo preços mais atrativos.

No Brasil, o uso de estufas de polietileno apresenta diversas funções, considerando a extensão e a localização geográfica. Nas regiões Sul e Sudeste, por exemplo, as estufas de polietileno atuam como reguladores térmicos, reduzindo o efeito prejudicial causado em algumas culturas por baixas temperaturas e geadas (COSTA et al., 2011). Nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, com altas temperaturas, as estufas de polietileno proporcionam alterações microclimáticas benéficas às plantas por meio de um controle mais adequado dos elevados níveis quantitativos das radiações solares global, difusa e fotossinteticamente ativa (PAR), dentre outros (SANTOS et al., 2017). Ao mesmo tempo, as estufas de polietileno minimizam os efeitos adversos de ventos fortes, chuvas e granizo que normalmente causam danos às plantas, não apenas fisiologicamente, mas também mecanicamente, e reduzem a incidência de pragas (KHOSHNEVISAN et al., 2013).

As estufas de polietileno permitem a produção de produtos de alta qualidade e podem atingir um aumento de produtividade em torno de 30% a 50% maior que o ambiente externo, conforme demonstrado por estudos com pepino, pimentão, feijão e tomate (GALVANI et al., 2000; CUNHA et al., 2003; SOUZA & ESCOBEDO, 1997; HELDWEIN et al., 2010; CARVALHO et al., 2005). Esse aumento está relacionado ao melhor controle das alterações microclimáticas que ocorrem em seu interior (FARIAS et al., 1993; ESCOBEDO et al., 1994; FRISINA & ESCOBEDO 1999; HOLCMAN & SENTELHAS, 2012; GALVANI et al., 2001, CUNHA et al., 2002; PEZZOPANE ET al., 1995; COSTA et al., 2010; BECKMANN et al., 2006). Por exemplo, polietilenos de diferentes espessuras usadas em coberturas de estufa causam mudanças de energia na radiação de ondas curtas, modificando a relação entre radiações solares global, difusa e direta. Isso também ocorre para os componentes espectrais da radiação solar, especialmente para a radiação solar fotossinteticamente ativa (PAR) (ESCOBEDO et al., 2011), cujos comprimentos de onda (0,4-0,7 µm) são de interesse para a fotossíntese (ANDRADE et al., 2014). O aumento da difusão promovida pelo polietileno e consequentemente o aumento

da radiação par-difusa no interior da estufa permite maior absorção de energia pela planta, convertendo-a em matéria orgânica por meio da fotossíntese. A radiação difusa tem uma distribuição mais homogênea no espaço e, portanto, possui uma interação mais eficiente com a arquitetura foliar (HUAWEI et al., 2010).

Com relação às ondas longas, os valores energéticos dentro da estufa são diferentes dos valores do meio externo, visto que o uso do ambiente protegido promove um controle mais adequado das temperaturas. Portanto, o conhecimento do balanço de radiação (radiação de onda curta + onda longa) dentro da estufa é importante para qualquer cultura agrícola, pois fornece a energia para o processo de fotossíntese e para o processo de evapotranspiração, que afeta diretamente a demanda de água (JUNIOR et al., 2015). Muitos artigos na literatura relacionam o balanço de radiação ao desenvolvimento de culturas agrícolas (SIMON & ANGELOCCI, 2014).

No entanto, poucas estações meteorológicas no mundo medem rotineiramente a radiação de ondas longas devido ao alto investimento financeiro dos dispositivos de medição. Assim, na ausência de medidas, é comum o uso de equações estatísticas para estimar a radiação de ondas longas em função de parâmetros meteorológicos como temperatura, pressão do vapor de água, fluxo de calor do solo e luz do sol (BOWEN, 1926; BRUNT, 1932; LHOMME et al., 2007). Portanto, como é muito difícil encontrar artigos que usem diretamente as medidas do saldo de radiação (radiações global, refletida, atmosférica e terrestre), principalmente para estufas de polietileno, o objetivo deste trabalho é medir, analisar e comparar as quatro componentes do saldo de radiação dentro e fora de uma estufa de polietileno. A hipótese do trabalho é de que o ambiente protegido promove mudanças significativas nos valores das radiações de ondas curtas e de ondas longas. Dessa forma, os resultados poderão subsidiar trabalhos futuros que tenham como meta propor equações de estimativa do saldo de radiação no interior de ambientes protegidos.

TEORIA DA RADIAÇÃO

Radiação é o nome dado ao processo de transferência de energia de um ponto para outro por meio de ondas eletromagnéticas, independentemente da existência de um meio material ou não. A energia transmitida dessa maneira é chamada energia radiante e é classificada de acordo com seu comprimento de onda (ou frequência). O conjunto de energias

emitidas para as diferentes faixas de comprimentos de onda constituem o espectro de emissão eletromagnética, como raios gama, raios-x, ondas de rádio, microondas, raios ultravioleta e infravermelho, entre outros (BLAL et al., 2020).

Todo corpo com uma temperatura maior que 0 K emite radiação. De acordo com a Lei de Planck, essa emissão ocorre para um intervalo definido de comprimentos de onda que depende da temperatura do corpo. Quanto mais altas as temperaturas, menores os comprimentos de onda. Dessa forma, o Sol possui um espectro de emissão de ondas curtas para comprimentos de onda entre 0,3 e 2,8 µm a uma temperatura superficial de 6000 K. Por outro lado, a superfície e a atmosfera da Terra, com temperaturas em torno de 300 K, têm um espectro de emissão de ondas longas com comprimentos de onda superiores a 4 µm (IQBAL, 1983).

A energia disponível para praticamente todos os processos que ocorrem na superfície da Terra se origina da radiação solar (radiação de ondas curtas). Quando essa energia atinge a superfície e aquece o solo e a atmosfera, esta também irradia energia (radiação de ondas longas). A natureza dessas radiações (onda curta e onda longa) permite a propagação de energia em diferentes comprimentos de onda e, portanto, sua interação com os constituintes atmosféricos é a mais variada. Assim, a distribuição de energia na superfície terrestre apresenta dependência espacial e temporal (LIU et al., 2020), consequentemente com impactos no clima e na vegetação (WILSON & MEYERS, 2007). Isso influencia o metabolismo das plantas (produção de biomassa) através da fotossíntese (GÓMEZ et al., 1998), o uso racional da água na agricultura através da evapotranspiração e balanço hídrico (PEREIRA et al., 2007, RANA & KATERJI, 2000), modelos de previsão do tempo (MOHAMMADI & GOUDARZI, 2018), entre outros.

BALANÇO DE RADIAÇÃO DE ONDAS CURTAS (BOC)

O espectro da radiação solar incidente na superfície da Terra consiste predominantemente de ondas curtas, ou seja, comprimentos de onda entre 0,3 e 2,8 µm. No entanto, a radiação de ondas curtas tem seus valores atenuados ao interagir com os constituintes atmosféricos através dos fenômenos de absorção, reflexão e transmissão. Desta forma, a atmosfera desempenha um papel fundamental nos valores da radiação solar medidos na superfície (GUTIÉRREZ-TRASHORRAS et al., 2018). A componente da radiação solar que

atinge a superfície é conhecida como radiação solar global (OC_{glo}). Dependendo das características da superfície, uma porção pode ser refletida de volta para atmosfera. Esse tipo de radiação solar é chamado radiação solar refletida (OC_{refl}). O balanço de radiação de ondas curtas (BOC) é calculado pela diferença entre as radiações solares global (OC_{glo}) e refletida (OC_{refl}), de acordo com a equação (1):

$$BOC = OC_{glo} - OC_{refl} \quad (1)$$

A perda por reflexão depende das propriedades da superfície, como rugosidade e cor. Essas propriedades da superfície são conhecidas como albedo (α), definidas por:

$$\alpha = \frac{OC_{refl}}{OC_{glo}} \quad (2)$$

Os valores de albedo (α) têm sido amplamente estudados em vários tipos de superfícies vegetadas (PINKER et al., 1980; ASSIS et al., 1997; SOUZA et al., 2010). Consequentemente, o balanço de radiação de ondas curtas (BOC) pode ser expresso como:

$$BOC = OC_{glo} * (1 - \alpha) \quad (3)$$

BALANÇO DE RADIAÇÃO DE ONDAS LONGAS (BOL)

A radiação solar (radiação de ondas curtas), no planeta Terra, fornece energia para a atmosfera e o solo que, quando aquecido, também emite radiação de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann (Equação (4)).

$$E = \varepsilon * \sigma * T^4 \quad (4)$$

Sendo E a energia emitida pelo corpo ($MJm^{-2}dia^{-1}$), ε é a emissão do corpo (sem dimensão), σ é a constante de Stefan-Boltzmann (σ = $4{,}903x10^{-9}$ $MJm^{-2}dia^{-1}K^{-4}$) e T é a temperatura do corpo (K). Essas radiações são emitidas na faixa do espectro de ondas longas (3 a 45 µm) e, como dependem da temperatura, também são conhecidas como radiações térmicas (ZHANG et al., 2018).

Assim, a radiação de ondas longas disponível na superfície da Terra é composta por duas componentes: radiação atmosférica (OL_{atm}) e radiação terrestre (OL_{terr}). A primeira depende da temperatura do ar, da quantidade de vapor d´água e da cobertura de nuvens (DAI & FANG, 2014). A segunda depende da temperatura do solo e da cobertura vegetal (GOLKAR et al., 2018). Além disso, o balanço de radiação de ondas longas (BOL) é dado pela diferença entre as radiações atmosférica e terrestre, de acordo com a equação (5).

$$BOL = OL_{atm} - OL_{terr} \quad (5)$$

SALDO DE RADIAÇÃO (SR)

O saldo de radiação (SR) representa os ganhos e perdas energéticos provenientes da interação dos fluxos radiativos com a atmosfera e a superfície. Portanto, representa a energia total líquida disponível no ambiente para processos biológicos e físicos. Assim, o saldo de radiação é calculado pela soma entre os balanços de radiação de ondas curtas (BOC) e ondas longas (BOL), de acordo com a equação (6).

$$SR = BOC + BOL \quad (6)$$

sendo SR o saldo de radiação ($MJm^{-2}dia^{-1}$); BOC o balanço de radiação de ondas curtas ($MJm^{-2}dia^{-1}$) e; BOL o balanço de radiação de ondas longas ($MJm^{-2}dia^{-1}$). Ao combinar as equações (1), (5) e (6), o saldo de radiação pode ser expresso em função dos quatro componentes radiativos, de acordo com a equação (7):

$$SR = OC_{glo} - OC_{refl} + OL_{atm} - OL_{terr} \quad (7)$$

SALDO DE RADIAÇÃO EM AMBIENTE PROTEGIDO

O conhecimento do saldo de radiação no interior de ambientes protegidos tem grande utilidade na compreensão e prevenção de fenômenos desfavoráveis, como a formação de geadas (BECKMANN et al., 2006). Também ajuda a compreender melhor as alterações causadas pelo plástico no regime térmico dentro dessas estruturas. Essas alterações microclimáticas têm importância por fornecerem melhores condições para as plantas. (KHOSHNEVISAN et al., 2013).

O saldo de radiação interno pode ser definido pelas mesmas componentes do saldo de radiação, medidas no interior da estufa e após sofrerem interações com o plástico:

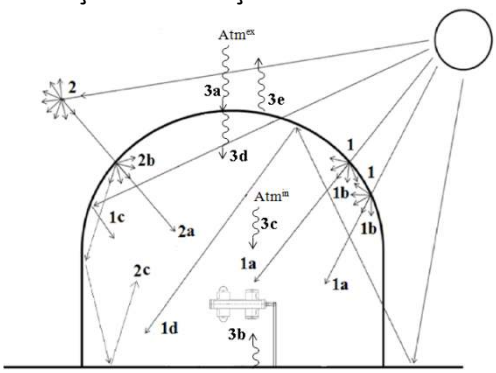
$$SR^{in} = OC_{glo}^{in} - OC_{refl}^{in} + OL_{atm}^{in} - OL_{terr}^{in} \quad (8)$$

O índice "*in*", que consta na equação (8), refere-se às componentes da radiação medidas no interior da estufa de polietileno. Estas componentes não são iguais às suas componentes externas. A cobertura de polietileno provoca alterações ao transmiti-las para o interior da estufa.

No espectro de ondas curtas a principal componente é a radiação global. A radiação global externa ao incidir sobre a cobertura de polietileno sofre os processos de reflexão e transmissão. A fração refletida é perdida e não contribui na medida da radiação global interna. A fração transmitida é a fração de interesse e já foi amplamente discutida na literatura especializada. A transmissividade na cobertura depende de vários fatores como tipo e espessura da cobertura (SOUSA et al., 2004), tempo de uso e quantidade de sujeiras depositadas na cobertura (BECKMANN et al., 2006), ângulo de incidência (POLLET & PIETERS, 1999) e concentração de vapor de água na cobertura (BURIOL et al.,1995; FARKAS et al. 2001), entre outros. A transmissividade depende ainda das condições do céu: a transmissão em dias de céu nublado de 80,0% é maior que em dias de céu claro de 78,0%. No geral, resultados mostram que a transmissividade da radiação global ($\frac{OC_{glo}^{in}}{OC_{glo}^{ext}}$) na cobertura de polietileno situa-se entre os valores de 70,0% a 80,0% (SOUSA et al., 2004).

A radiação global divide-se em duas componentes: fração global direta e fração global difusa. A radiação solar direta é a fração da radiação solar global que não sofre interação com elementos constituintes atmosféricos e incide de modo unidirecional. A radiação global difusa é a fração da radiação solar global que interage com algum elemento atmosférico e sofre espalhamento multidirecional. As radiações direta e difusa do espectro total (0,3 a 2,8 µm) ao interagirem com a cobertura de polietileno tipo túnel são transmitidas para dentro da estufa, como mostra o esquema na Figura 1:

Figura 1 - Esquema da interação das radiações direta e difusa na estufa de polietileno.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

As radiações direta e difusa, após interagirem com a cobertura de polietileno, contribuem nas medidas da radiação global interna com as seguintes componentes: 1a- direta transmitida; 1b- direta espalhada; 1c-refletida; 1d-multirefletidas das superfícies horizontal interna e externa, e então espalhada ou refletida novamente na cobertura. Já a radiação difusa contribui com as componentes: 2a- radiação difusa externa transmitida direcionalmente, 2b- difusa espalhada e 2c- difusas refletidas na cobertura e todas as demais irradiâncias difusas que sofreram múltiplas reflexões na superfície horizontal e na cultura.

Similarmente, as radiações direta e difusa após interagirem com a cobertura de polietileno contribuem nas medidas da radiação refletida solar somente a componente: 1b- direta espalhada; 1c-refletida; 1d-multirefletidas das superfícies horizontal interna e externa, e então espalhada ou refletida novamente na cobertura. A componente refletida 1c tem grande dependência com o tipo de cobertura do solo, ou das propriedades da cultura implantada no interior da estufa (ASSIS et al, 1997). Em geral culturas com colorações mais claras têm maior albedo, ou poder de reflexão, e conseguem elevar os valores da radiação global interna.

As radiações de ondas longas são consideradas ondas com baixas quantidades de energia (3 a 45 µm). Por ter essa natureza termal essas ondas não sofrem transmissão na cobertura de polietileno, mas sim absorção. A cobertura ao absorver esta energia sofre um aquecimento e passa a emitir multidirecionalmente essa energia. A radiação de ondas longas atmosférica externa (componente 3a na Figura1) é absorvida pela cobertura e emite uma fração dessa energia de volta para a atmosfera (3e) e uma fração dessa energia para o interior da estufa (3d). Similarmente ao ambiente fora da estufa o solo adquire energia térmica e também passa a emitir energia (radiação terrestre interna: componente 3b da Figura1).

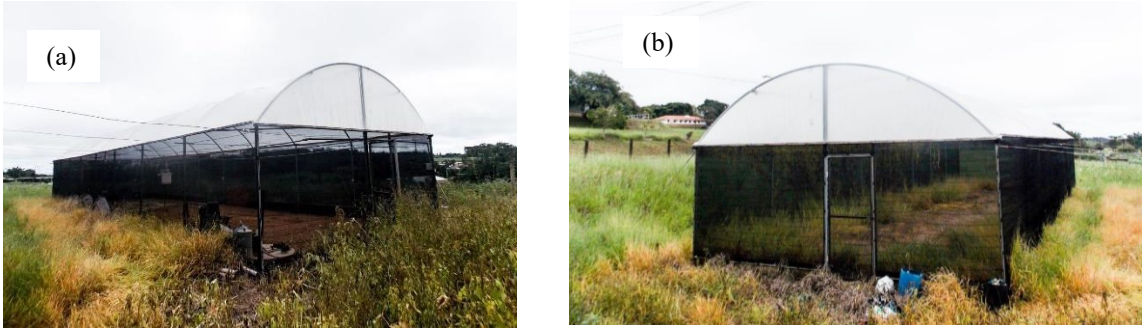
Devido ao confinamento e à ausência de trocas convectivas de calor no interior de uma estufa, as componentes 3b e 3d provocam um aumento na temperatura da atmosfera interna, ocasionando uma temperatura no interior da estufa maior em comparação à temperatura externa da estufa. Essa atmosfera interna mais aquecida emitirá uma quantidade maior de energia em relação ao meio externo. A radiação de ondas longa atmosférica interna é representada pela soma das componentes 3c e 3d.

MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado no campo experimental da Estação de Radiometria Solar localizada na Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, cidade de Botucatu, SP (latitude 22,9º Sul, longitude 48,45º Oeste e altitude 785 m). O clima de Botucatu é classificado como Cwa (critério KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), verão quente e úmido e inverno seco. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro e o mais curto (solstício de inverno) é 10,6 horas em junho. Os meses de fevereiro e julho são os mais quentes e frios do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2 ºC e 17,1 ºC, enquanto fevereiro e agosto são os meses mais e menos úmidos, com porcentagens de 78,2% e 61,8%, respectivamente. Já a precipitação consiste em dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde a fronteira entre os períodos é de aproximadamente 100 mm de precipitação. Durante a estação chuvosa, de outubro a março (primavera e verão), as chuvas são de natureza convectiva, originadas do processo de convecção livre. Na estação seca, de abril a setembro (outono e inverno), as chuvas são do tipo frontal, originadas do encontro de massas frias e secas vindas do Sul com massas quentes e úmidas do Sudeste. A precipitação mais alta ocorre em janeiro, com 260,7 mm no total, e a mínima em agosto, com 38,2 mm (ESCOBEDO et al., 2011).

A estufa utilizada no estudo foi uma estufa de polietileno de 100µm tipo túnel, com 24m de comprimento, 7m de largura, 2m de pé direito, 1,7 m de altura da concavidade e área total de 168 m^2. A Figura 2 mostra a estufa de polietileno utilizada no trabalho.

Figura 2 - Estufa de polietileno. a) Vista lateral. b) Vista frontal.



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

O instrumento utilizado para obtenção dos valores do saldo de radiação foi um radiômetro solar modelo CNR1 da Kipp e Zonen, o qual realizava a medida concomitante de suas quatro componentes: radiação solar global, radiação solar refletida, radiação atmosférica e radiação terrestre. Foram realizadas calibrações do equipamento sempre antes do início de um período de medições. A Estação de Radiometria Solar possui radiômetros solares adicionais usados anualmente apenas para calibração utilizando o método comparativo. Neste caso foi usado um piranômetro Eppley PSP como referência para calibração. A Figura 3 mostra o radiômetro CNR1 utilizado no monitoramento das radiações de ondas curtas e ondas longas.

Figura 3 - Radiômetro CNR1



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Todos os sensores foram conectados a um registrador automático de dados modelo 21X da Cambell Scientific Inc, programado para operar numa frequência de varredura de 0,2

Hz. Ao final de 5 minutos, médias eram calculadas e armazenadas num banco de dados. Rotinas de controle de qualidade foram aplicados aos dados em função de valores discrepantes devido ao mau funcionamento de sensores, desligamentos de energia elétrica, corte acidental de fios, dentre outros.

Os valores das radiações foram monitorados no formato Wm^{-2} (Potência/Área) e integrados no tempo para partição diária no formato $MJm^{-2}dia^{-1}$ (Energia/Área). Em seguida, os valores foram agrupados mensalmente e extraídas suas médias mensais, também no formato $MJm^{-2}dia^{-1}$. Para confecção dos gráficos, foram utilizados os valores médio-mensais das radiações.

As medidas das radiações foram tomadas dentro e fora da estufa de polietileno a fim de comparação. No entanto, pelo fato do equipamento demandar elevado aporte financeiro, a Estação de Radiometria Solar dispõe de apenas uma unidade do saldo radiômetro CNR1 e, portanto, o arranjo experimental foi realizado em 2 períodos distintos: a medição no interior da estufa foi realizada de 03/2008 a 02/2009, enquanto que as medições na área externa à estufa foram realizadas de 03/2011 a 02/2012.

Como as medidas dentro e fora da estufa foram realizadas em épocas diferentes, foi necessário verificar se os dois períodos de medição não apresentam diferenças significativas nas variáveis meteorológicas, nebulosidade e temperatura a ponto de interferirem nas medidas das radiações. A nebulosidade desempenha papel decisivo nos níveis de radiação global (ondas curtas) medidos em superfície e foi calculada utilizando heliogramas de brilho solar monitorados por um heliógrafo Campbell-Strokes. A equação (9) mostra o cálculo da nebulosidade.

$$Neb = 1 - \frac{n}{N} \qquad (9)$$

sendo Neb a nebulosidade (adimensional), n as horas de brilho solar (h) e N o fotoperíodo (h). Já a temperatura está relacionada à radiação termal (ondas longas) e foi medida por uma sonda probe do tipo HMP45C da marca Vaisala. As Tabelas 1 e 2 mostram as médias mensais, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação da nebulosidade e temperatura, respectivamente. São também apresentados o número de observações, o teste t de Student calculado e a probabilidade a 5% de significância.

Tabela 1 - Média, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação da nebulosidade nos períodos 2008/2009 e 2011/2012.

Mês	2008/2009				2011/2012				N	t_{calc}	Valor-p
	$\underline{M}$	sd	V	CV (%)	$\underline{M}$	sd	V	CV(%)			
3	0,394[a]	0,26	0,066	65,20	0,624[a]	0,29	0,083	46,17	31	3,32	0,002*
4	0,469	0,33	0,108	70,07	0,364	0,27	0,074	74,73	29	-1,32	0,192
5	0,354	0,34	0,118	97,04	0,273	0,22	0,047	79,41	31	-1,10	0,274
6	0,377	0,28	0,079	74,55	0,239	0,26	0,068	109,11	30	-1,98	0,053
7	0,163	0,20	0,039	121,16	0,282	0,25	0,061	87,58	28	1,99	0,052
8	0,335	0,31	0,099	93,92	0,330	0,32	0,101	96,30	31	-0,06	0,952
9	0,346	0,28	0,081	82,26	0,280	0,21	0,043	74,06	30	-1,02	0,312
10	0,524	0,31	0,097	59,44	0,461	0,33	0,106	70,62	31	-0,77	0,443
11	0,433	0,26	0,070	61,10	0,390	0,32	0,105	83,09	30	-0,57	0,568
12	0,385	0,24	0,056	61,47	0,321	0,23	0,055	73,06	31	-1,06	0,293
1	0,671	0,32	0,101	47,36	0,557	0,30	0,089	53,56	31	-1,46	0,151
2	0,548	0,26	0,067	47,23	0,411	0,26	0,066	62,51	28	-1,97	0,054

N é número de observações; t é teste t de Student e p é probabilidade a 5% de significância.
[a] - houve diferença significativa entre as médias.
* - valor-p calculado menor que valor-p 5% de significância (p=0,05)

Tabela 2 - Média, desvio-padrão, variância e coeficiente de variação da temperatura nos períodos 2008/2009 e 2011/2012.

Mês	2008/2009				2011/2012				N	t_{calc}	Valor. p
	$\underline{M}$ (ºC)	sd	V	CV (%)	$\underline{M}$ (ºC)	sd	V	CV (%)			
3	23,03	1,71	2,91	7,41	22,05	2,71	7,35	12,30	31	-1,72	0,091
4	21,59	1,70	2,89	7,87	21,32	2,58	6,65	12,10	30	-0,47	0,638
5	18,32	2,63	6,93	14,37	18,21	2,05	4,20	11,25	31	-0,18	0,859
6	17,61	2,96	8,79	16,84	16,66	2,75	7,59	16,54	30	-1,28	0,207
7	19,13	2,14	4,56	11,16	18,42	3,03	9,18	16,45	31	-1,08	0,286
8	20,31	2,47	6,08	12,14	18,31	5,03	25,26	27,45	31	-1,99	0,051
9	20,30	3,32	10,99	16,33	20,00	2,86	8,16	14,28	30	-0,38	0,709
10	22,48	2,94	8,62	13,06	21,95	2,57	6,63	11,73	31	-0,75	0,454
11	22,01	1,63	2,67	7,42	21,53	2,61	6,83	12,14	30	-0,85	0,397
12	23,85	2,11	4,47	8,86	24,17	2,22	4,93	9,19	31	0,57	0,571
1	22,55	1,87	3,48	8,27	23,39	1,58	2,50	6,76	31	1,92	0,059
2	24,79	0,85	0,72	3,42	25,24	0,89	0,80	3,54	28	1,94	0,057

N é número de observações; t é teste t de Student e p é probabilidade a 5% de significância.
Não houve diferença significativa entre as médias.

Para nebulosidade, os valores médio-mensais dos dois períodos seguem uma mesma tendência: menor nebulosidade para o período seco do inverno e maior nebulosidade para o período úmido do verão. A exceção ocorreu para o mês de março, o qual apresentou valor considerado baixo de 0,394 para o período de 2008/2009, visto que de acordo com o clima da região, março é um mês de elevada nebulosidade. Como nesse período foi realizado o experimento dentro da estufa, essa ocorrência favoreceu um valor mais elevado da radiação global externa e, consequentemente, da radiação global no interior da estufa, causando uma situação física improvável ao comparar os dois períodos de medição: radiação global interna maior que a radiação global externa. A 5% de significância, o teste t mostrou que no mês de março as médias de nebulosidade dos períodos 2008/2009 e 2011/2012 foram significativamente diferentes e, portanto, optou-se por descartar o mês de março das análises dos resultados.

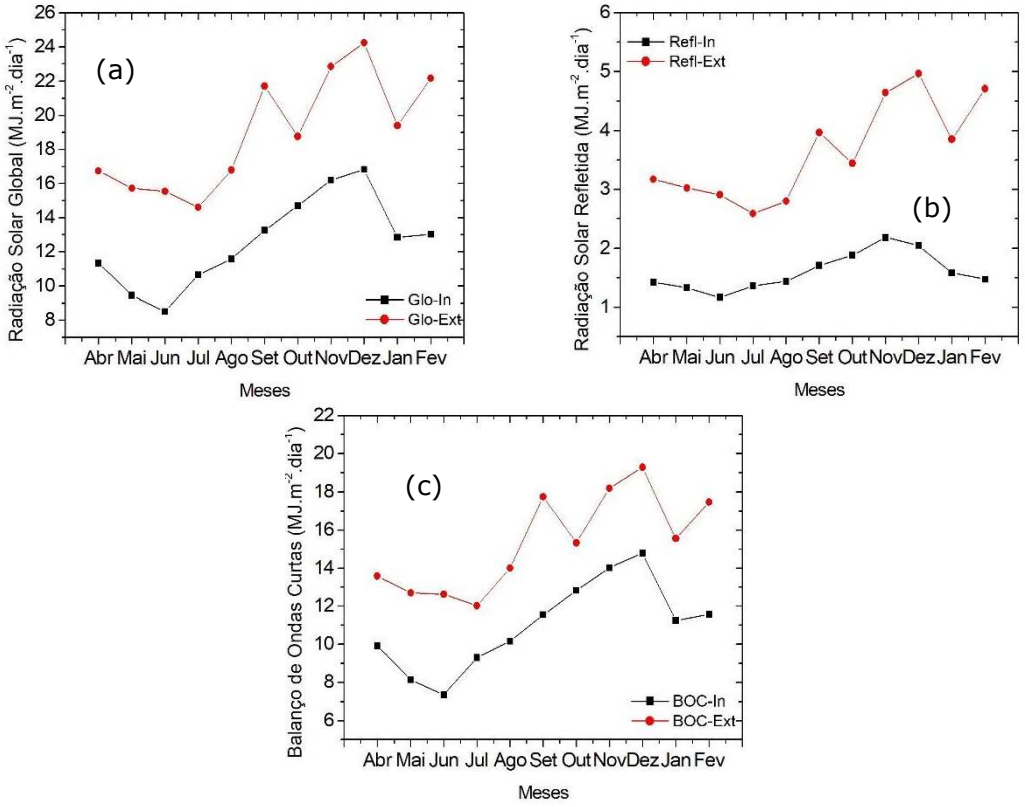
Já para a temperatura externa observou-se que, em todos os meses dos dois períodos, as médias mensais foram significativamente iguais com 5% de significância. Dessa forma, com exceção do mês de março, os dois períodos de medição apresentaram valores de nebulosidade e temperatura similares e, portanto, podemos assegurar que, caso haja diferenças energéticas entre os dois períodos, essas diferenças podem ser atribuídas ao uso do ambiente protegido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Evolução anual das radiações de ondas curtas: radiações global e refletida

A Figura 6 mostra a evolução anual das radiações de onda curta por meio de seus valores médios-mensais diários. Na Figura 6 (a) são apresentados os valores de radiação global dentro e fora, na Figura 6 (b) os valores de radiação refletida dentro e fora e na Figura 6 (c) o balanço de ondas curtas dentro e fora da estufa de polietileno.

Figura 6 - Valores médios mensais da incidência (a) e reflexão (b) de radiação de ondas curtas, assim como o balanço de ondas curtas (c) dentro e fora da estufa de polietileno em Botucatu (SP).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

As radiações global e refletida no interior da estufa seguem as variações sazonais das radiações global e refletida externa ao longo do ano: valores mais elevados no verão e valores menos elevados no inverno. A sazonalidade é devido à variação astronômica do sol (declinação do sol), latitude (local), e principalmente, devido às variações climáticas das nuvens e vapor d'água, características de cada mês, ou estação do ano. No verão e primavera, a energia da radiação é mais elevada, porque o sol declina no hemisfério sul mais próximo da latitude local (-23,51^0) que quando declina no hemisfério norte, durante o outono e inverno. Apesar de o verão apresentar valores mais energéticos, esse período é caracterizado por maiores episódios de nebulosidade, o que justifica as oscilações observadas na intensidade de seus valores radiativos.

Em relação aos valores energéticos dentro e fora da estufa, observa-se que, tanto para a radiação global como para a refletida, os valores das médias de dentro da estufa são menores que os valores de fora. Para verificar se essa diferença é estatisticamente significativa, foi aplicado um teste de hipóteses (teste t de Student) com 5% de significância.

A Tabela 3 mostra as médias mensais, a variância e o valor-p da aplicação do teste de hipóteses para as radiações global e refletida.

Tabela 3 - Médias-mensais, variância e valores-p das radiações de ondas curtas global e refletida no interior e no exterior da estufa de polietileno.

Mês	Radiação Global ($MJm^{-2}dia^{-1}$)					Radiação Refletida ($MJm^{-2}dia^{-1}$)				
	Interior		Exterior		Valor.p	Interior		Exterior		Valor.p
	$\underline{M}$	Var	$\underline{M}$	Var		$\underline{M}$	Var	$\underline{M}$	Var	
4	$11,34^{a}$	13,50	$16,75^{a}$	26,80	$1,9x10^{-5}$ *	$1,42^{l}$	0,43	$3,17^{l}$	0,96	$3,7x10^{-11}$ *
5	$9,46^{b}$	12,05	$15,73^{b}$	10,36	$1,1x10^{-9}$ *	$1,33^{m}$	0,27	$3,02^{m}$	0,43	$5,7x10^{-16}$ *
6	$8,51^{c}$	4,96	$15,54^{c}$	15,26	$1,4x10^{-10}$ *	$1,16^{n}$	0,10	$2,91^{n}$	0,54	$2,5x10^{-15}$ *
7	$10,69^{d}$	0,53	$14,61^{d}$	13,02	$1,3x10^{-6}$ *	$1,38^{o}$	0,03	$2,59^{o}$	0,41	$7,5x10^{-13}$ *
8	$10,82^{e}$	10,79	$16,80^{e}$	29,58	$2,9x10^{-5}$ *	$1,32^{p}$	0,15	$2,80^{p}$	0,84	$3,5x10^{-9}$ *
9	$12,60^{f}$	26,41	$21,72^{f}$	14,06	$9,9x10^{-10}$ *	$1,62^{q}$	0,48	$3,97^{q}$	0,46	$6,2x10^{-17}$ *
10	$14,70^{g}$	16,05	$18,76^{g}$	64,09	$2,4x10^{-2}$ *	$1,88^{r}$	0,26	$3,44^{r}$	2,59	$2,0x10^{-5}$ *
11	$16,20^{h}$	20,41	$22,85^{h}$	46,02	$4,6x10^{-5}$ *	$2,18^{s}$	0,43	$4,64^{s}$	1,99	$8,7x10^{-12}$ *
12	$16,83^{i}$	14,52	$24,24^{i}$	21,94	$4,4x10^{-9}$ *	$2,05^{t}$	0,25	$4,97^{t}$	0,99	$1,3x10^{-21}$ *
1	$12,84^{j}$	31,90	$19,41^{j}$	50,21	$1,6x10^{-4}$ *	$1,58^{u}$	0,57	$3,85^{u}$	1,97	$6,2x10^{-11}$ *
2	$13,04^{k}$	30,72	$22,18^{k}$	33,96	$1,1x10^{-5}$ *	$1,47^{v}$	0,37	$4,71^{v}$	3,56	$9,2x10^{-8}$ *

p é probabilidade a 5% de significância resultante da aplicação do teste t de Student.
^{a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k} - houve diferença significativa entre as médias-mensais.
^{l,m,n,o,p,q,r,s,t,u,v} - houve diferença significativa entre as médias-mensais.
* - valor-p calculado menor que valor-p 5% de significância (p=0,05)

Da comparação mês a mês, a 5% de significância, a Tabela 3 mostra que todos os valores-p foram inferiores a 0,05, tanto para a radiação global quanto para a radiação refletida. Portanto, rejeitamos a hipótese nula de igualdade das médias e atribuímos que a diferença entre as médias-mensais para as radiações de ondas curtas é devido ao uso do ambiente protegido. De fato, o plástico que cobre a estufa promove maior atenuação dos valores das radiações no interior da estufa, causando essa diferença observada (BURIOL et al, 1999; DE SÁ ANDRADE, 2011).

Em relação aos valores quantitativos, o valor da radiação global interna variou de 8,51 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no mês de junho a 16,83 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no mês de dezembro enquanto que o valor de radiação global externa variou de 14,61 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no mês de julho a 24,24 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no mês de dezembro. O valor médio anual foi de 12,46 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para a radiação global interna e 18,96 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para a radiação global externa. Já a transmitância do plástico ficou entre 55% a 79%, com valor médio anual de 66%. Esse intervalo de valores da transmitância está de

acordo com valores obtidos por Buriol et al (1995), Frisina e Escobedo (1999), Cunha et al (2002), Beckman et al (2006) e De Sá Andrade et al (2011).

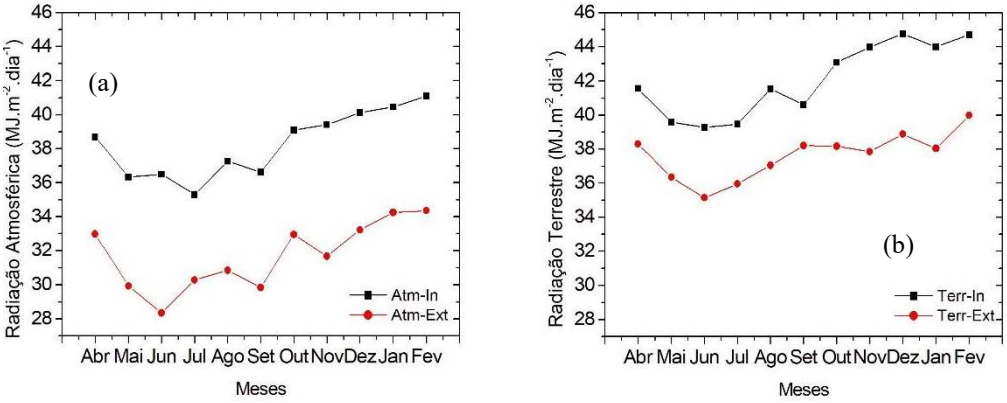
Já para a radiação refletida, dentro da estufa os valores variaram de 1,16 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no mês de junho a 2,18 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no mês de novembro e fora da estufa variaram de 2,59 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no mês de julho a 4,97 $MJm^{-2}dia^{-1}$ no mês de dezembro. Os valores médio-anuais foram: radiação refletida interna 1,61 $MJm^{-2}dia^{-1}$ e; radiação refletida externa 3,56 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Frisina e Escobedo (1999) encontraram valores de 0,67 $MJm^{-2}dia^{-1}$ a 6,22 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para a radiação solar refletida interna e 0,63 $MJm^{-2}dia^{-1}$ a 7,53 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para a radiação solar refletida externa.

Similarmente, a evolução anual do balanço de ondas curtas (BOC) (Figura 6c) mostra que as variações dos valores médio mensais são sazonais e dependem das variações climáticas: os valores do BOC são maiores no período úmido, meses de outubro a fevereiro, nos quais a nebulosidade e a concentração do vapor de água são mais elevadas no ano. Por outro lado, são menores no período seco, meses de abril a setembro, nos quais a nebulosidade e concentração do vapor de água são menores no ano. No período seco os valores do BOC interno variaram de 7,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em junho a 11,5 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em setembro, e no período úmido de 11,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em janeiro a 14,8 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em dezembro. No total o valor do BOC interno médio anual foi de 11,2 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Para o BOC externo, no período seco os valores variaram de 12,0 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em julho a 17,7 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em setembro. Para o período úmido a variação foi de 15,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em outubro a 19,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em dezembro. A média anual foi de 15,0 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Frisina e Escobedo (1999) encontraram valores médios anuais de 12,84 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para BOC interno e 16,43 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para BOC externo.

Evolução anual das radiações de ondas longas: radiações atmosférica e terrestre

As Figuras 7 (a) e 7 (b) mostram a evolução anual das radiações de ondas longas por meio de seus valores médio-mensais: atmosférica interna e externa e terrestre interna e externa, respectivamente.

Figura 7 - Valores médios mensais de emissão atmosférica (a) e terrestre (b) de radiação de ondas longas dentro e fora da estufa de polietileno em Botucatu (SP).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Em relação aos valores energéticos dentro e fora da estufa, observa-se que, tanto para a radiação atmosférica como para a terrestre, os valores das médias mensais de dentro da estufa foram maiores que os valores de fora. Para verificar se essa diferença é estatisticamente significativa, também foi aplicado um teste de hipóteses (teste t de Student) com 5% de significância. A Tabela 4 mostra as médias mensais, a variância e o valor-p da aplicação do teste de hipóteses para as radiações atmosférica e terrestre.

Tabela 4 - Médias-mensais, variância e valores-p das radiações de ondas longas atmosférica e terrestre no interior e no exterior da estufa de polietileno.

Mês	Radiação Atmosférica ($MJm^{-2}dia^{-1}$)					Radiação Terrestre ($MJm^{-2}dia^{-1}$)				
	Interior		Exterior		Valor.p	Interior		Exterior		Valor.p
	$\underline{M}$	Var	$\underline{M}$	Var		$\underline{M}$	Var	$\underline{M}$	Var	
4	$38,68^{a}$	1,98	$32,98^{a}$	1,51	$7,5x10^{-11}$ *	$41,56^{l}$	1,36	$38,31^{l}$	1,74	$2,1x10^{-14}$ *
5	$36,34^{b}$	1,57	$29,93^{b}$	4,16	$5,1x10^{-21}$ *	$39,59^{m}$	1,22	$36,35^{m}$	1,02	$3,9x10^{-17}$ *
6	$36,50^{c}$	2,74	$28,36^{c}$	3,64	$3,6x10^{-22}$ *	$39,28^{n}$	2,47	$35,14^{n}$	1,22	$3,0x10^{-15}$ *
7	$35,31^{d}$	1,93	$30,28^{d}$	7,70	$2,2x10^{-9}$ *	$39,25^{o}$	1,76	$35,96^{o}$	7,01	$3,1x10^{-6}$ *
8	$36,56^{e}$	7,53	$30,85^{e}$	4,37	$1,4x10^{-9}$ *	$40,60^{p}$	6,59	$37,05^{p}$	4,23	$4,0x10^{-6}$ *
9	$36,63^{f}$	4,50	$29,83^{f}$	4,38	$5,5x10^{-15}$ *	$40,59^{q}$	3,49	$38,21^{q}$	3,13	$6,5x10^{-6}$ *
10	$39,71^{g}$	3,26	$32,95^{g}$	5,51	$2,8x10^{-16}$ *	$43,78^{r}$	6,71	$38,17^{r}$	2,08	$4,1x10^{-14}$ *
11	$39,42^{h}$	1,23	$31,68^{h}$	7,32	$1,7x10^{-20}$ *	$43,97^{s}$	1,73	$37,85^{s}$	5,39	$7,9x10^{-18}$ *
12	$40,13^{i}$	1,53	$33,22^{i}$	5,62	$2,7x10^{-21}$ *	$44,76^{t}$	2,13	$38,88^{t}$	3,94	$1,4x10^{-19}$ *
1	$40,46^{j}$	1,10	$34,25^{j}$	3,44	$1,3x10^{-23}$ *	$43,99^{u}$	3,44	$38,05^{u}$	0,64	$8,9x10^{-24}$ *
2	$41,11^{k}$	0,73	$34,36^{k}$	2,11	$5,4x10^{-20}$ *	$44,70^{v}$	4,22	$39,98^{v}$	4,64	$1,5x10^{-8}$ *

p é probabilidade a 5% de significância resultante da aplicação do teste t de Student.

^{a,b,c,d,e,f,g,h,i,j,k} - houve diferença significativa entre as médias-mensais.

^{l,m,n,o,p,q,r,s,t,u,v} - houve diferença significativa entre as médias-mensais.

* - valor-p calculado menor que valor-p 5% de significância (p=0,05)

Os valores-p calculados foram menores que 0,05 em todas as situações, tanto para a radiação atmosférica quanto para a radiação terrestre. Portanto, a 5% de significância, podemos afirmar que os valores médios mensais dentro e fora da estufa são estatisticamente diferentes e essa diferença pode ser atribuída ao ambiente protegido. As radiações de ondas longas são consideradas radiações termais e, portanto, estão relacionadas à temperatura. A arquitetura do ambiente protegido minimizou as trocas de calor com o meio externo, garantindo uma temperatura mais elevada e uniforme em seu interior, justificando assim as diferenças nos valores médio mensais das radiações de ondas longas dentro e fora da estufa (CUNHA et al, 2002).

Comparando valores dentro e fora da estufa, os valores energéticos no interior da estufa são maiores que os valores fora da estufa, o que demostra a influência do ambiente protegido. De fato, o ambiente protegido favorece aumento da temperatura e, com maior temperatura a emissão de ondas longas é aumentada, o que justifica os valores energéticos da parte interna serem maiores que os valores da parte externa. Outro fator relevante é a ausência do vento no interior de estufas causado pelas condições de confinamento gerado pela cobertura. O vento tem grande capacidade de realizar trocas convectivas de calor, fato que tende a provocar decréscimo na temperatura do ar (FATNASSI et al., 2009).

A evolução anual da radiação atmosférica acompanhou a evolução anual da temperatura (Figura 5(b)), com os menores valores ocorrendo no período do inverno e os maiores valores no período do verão. Para a radiação atmosférica interna, o menor valor foi de 35,31 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em julho e o maior valor foi de 41,11 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em fevereiro (mês mais quente e úmido do ano). O valor médio anual foi de 38,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Os valores da radiação atmosférica externa apresentaram mesmo comportamento, com valor mínimo de 28,36 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em junho e valor máximo de 34,36 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em fevereiro. O valor médio anual foi de 32,0 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Pashiardis et al. (2017) encontraram valores médios anuais para a radiação atmosférica externa de 29,1 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para Athalassa e 31,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para Larnaca em Chipre. Resultados similares também são reportados por Duarte et al. (2006), Vilani et al. (2010) e Masiri et al. (2017).

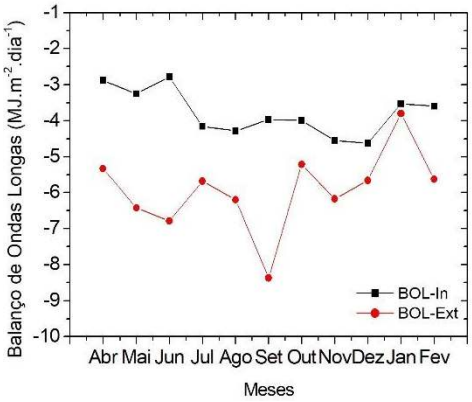
De forma similar, a evolução anual da radiação terrestre (Figura 7(b)) também acompanhou a evolução anual da temperatura. Para a radiação terrestre interna foram

observados os valores de mínimo e máximo de 39,28 $MJm^{-2}dia^{-1}$ e 44,76 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para os meses de junho e dezembro, respectivamente. O valor médio anual foi de 42,2 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Já para a radiação terrestre externa foram observados os valores de mínimo e máximo de 35,14 $MJm^{-2}dia^{-1}$ e 39,98 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para os meses de junho e fevereiro, respectivamente. O valor médio anual foi de 37,7 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Pashiardis et al. (2017) encontraram valores médios anuais para a radiação terrestre externa de 38,2 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para Athalassa e 37,4 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para Larnaca em Chipre. No geral, os valores da radiação terrestre foram superiores aos valores da radiação atmosférica. De fato, o solo, por apresentar maior inércia térmica, é menos sensível às variações de temperatura, o que justifica seus valores mais elevados de energia (CUNHA et al, 2002).

Os valores médio-mensais das radiações emitidas pela atmosfera e emitidas pela superfície terrestre são maiores no período chuvoso, verão e primavera, e menores no outono e inverno, no período da seca. A sazonalidade é devido às variações climáticas da temperatura, nebulosidade e principalmente vapor d'água, características de cada mês, ou estação do ano. No verão e primavera, a temperatura ambiente, as concentrações de nuvens e vapor de água são maiores no ano, enquanto que no outono e inverno, as temperaturas, concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera são menores do ano.

A evolução anual do balanço de ondas longas (BOL) é apresentada na Figura 8.

Figura 8 - Valores médios mensais do balanço de ondas longas dentro e fora da estufa de polietileno em Botucatu (SP).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

A evolução anual do balanço de radiação de ondas longas mostra que o fluxo de energia resultante é negativo em todos os meses dentro e fora da estufa de polietileno e, portanto, há perda de energia no sentido da superfície terrestre para a atmosfera. O valor do

BOL interno variou de -2,8 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em junho a -4,6 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em dezembro. O valor médio anual foi de -3,8 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Já o valor do BOL externo variou de -3,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em março a -8,4 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em setembro. O valor médio anual foi de -5,7 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Frisina e Escobedo (1999) encontraram valores médios anuais de -2,32 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para BOL interno e -4,60 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para BOL externo.

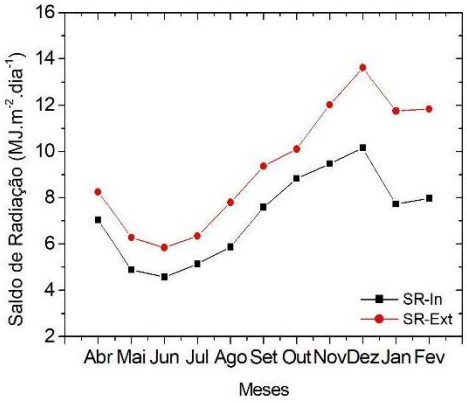
Os valores do BOL interno, em termos absolutos, foram menores que os do BOL externo, comprovando a importância do ambiente protegido em minimizar as perdas energéticas devido a emissão das radiações de ondas longas.

EVOLUÇÃO ANUAL DO SALDO DE RADIAÇÃO

O Saldo de Radiação (SR) é um importante parâmetro na área de Agrometeorologia, pois desempenha papel fundamental tanto no metabolismo quanto no consumo de água pelos vegetais (AN et al., 2017). Muitos modelos de estimativa de evapotranspiração utilizam dados do saldo de radiação em sua formulação, sendo o modelo de Penmann-Monteith o método de referência indicado pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (Boletim FAO-56 (ALLEN et al., 1991).

A Figura 9 mostra a evolução anual dos valores médio-mensais do Saldo de Radiação (SR) dentro e fora da estufa.

Figura 9 - Valores médios mensais do saldo de radiação dentro e fora da estufa de polietileno em Botucatu (SP).



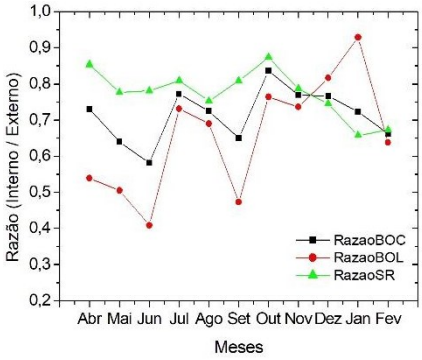
Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

Os valores do SR são menores no período seco do inverno e maiores no período úmido do verão. Para dentro da estufa, no período seco os valores variaram de 4,6 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em

junho a 7,6 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em setembro e no período úmido de 7,7 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em janeiro a 10,2 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em dezembro. O valor médio anual foi de 7,4 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Já fora da estufa, no período seco os valores variaram de 5,8 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em junho a 9,4 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em setembro e no período úmido de 10,1 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em outubro a 13,6 $MJm^{-2}dia^{-1}$ em dezembro. O valor médio anual foi de 9,3 $MJm^{-2}dia^{-1}$. Frisina e Escobedo (1999) encontraram valores médios anuais de 10,53 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para SR interno e 11,83 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para SR externo. Cunha et al (2002) encontraram valores médios anuais de 8,91 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para SR interno e 11,37 $MJm^{-2}dia^{-1}$ para SR externo.

Como mencionado anteriormente, os valores positivos do BOC expressaram a entrada de energia da atmosfera para a superfície em todos os meses do ano no sistema, enquanto que os valores negativos do BOL expressaram a saída (perda) de energia da superfície para atmosfera em todos os meses no ano. Já o SR, fruto da soma de BOC com BOL, apresentou valores médio-mensais positivos para todos os meses do ano, tanto dentro como fora da estufa. Com o objetivo de se verificar a influência do ambiente protegido nos valores médio-mensais dos balanços energéticos, a Figura 10 mostra a razão (valor interno / valor externo) entre os valores interno e externo do BOC, BOL e SR.

Figura 10 - Razões entre os balanços de radiação dentro e fora da estufa: Balanço de ondas curtas (BOC), Balanço de ondas longas (BOL) e Saldo de radiação (SR).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020)

A razão dos balanços energéticos para todos os meses do ano foi menor do que 1, comprovando o efeito atenuador do plástico. O valor médio-anual da razão para BOC foi de 0,71, para BOL de 0,66 e para SR de 0,77, ou seja, atenuação de 29% para BOC, 34% para BOL e 23% para SR.

Apesar dos balanços energéticos apresentarem valores menores dentro da estufa em relação aos valores externos, a vantagem do uso do ambiente protegido está no ganho de qualidade desses valores energéticos. Em relação ao BOC, a atenuação da radiação global pelo plástico se dá pela conversão da radiação direta incidente em radiação difusa que, por sua natureza isotrópica e multidirecional, é melhor aproveitada na fotossíntese pela arquitetura foliar (LIU et al., 2020). Em relação ao BOL, o ambiente protegido minimiza as perdas da radiação de ondas longas, as quais são importantes, pois estão relacionadas aos aspectos de germinação, crescimento, fotoperiodismo, floração e coloração de frutos, dentre outros (OBOT et al., 2018). Portanto, as estufas, por apresentarem valores positivos de SR, minimização dos ventos e regulação de temperatura ao longo do ano, inclusive nos meses mais frios do inverno, permitem um ambiente adequado de energia disponível para manutenção do metabolismo vegetal, favorecendo o cultivo em todas as épocas do ano.

CONCLUSÃO

O ambiente protegido promove mudanças significativas nos valores das radiações de ondas curtas e de ondas longas. Em relação às radiações de ondas curtas, os valores internos são menores que os valores externos devido à cobertura plástica, que reduz a quantidade de radiação incidente, transformando radiação direta em radiação difusa. A radiação difusa, por ser isotrópica e multidirecional, é melhor aproveitada na fotossíntese pela arquitetura foliar. Na média, para a radiação global incidente, a redução causada pela cobertura plástica é de 66%.

Em relação às radiações de ondas longas, os valores internos são maiores que os valores externos devido ao melhor controle da temperatura, visto que essas radiações são de natureza termal. Temperaturas mais uniformes e minimização ou até mesmo a ausência de vento garantem valores energéticos mais elevados no interior da estufa.

Tanto para o balanço de ondas curtas quanto para o balanço de ondas longas, os valores internos foram menores que os valores externos. Como os valores do balanço de ondas longas são negativos, os menores valores internos mostram que o uso do ambiente protegido minimiza as perdas da radiação de ondas longas, as quais estão relacionadas a aspectos de germinação, crescimento, fotoperiodismo, floração e coloração de frutos.

A cobertura plástica que converte radiação direta em difusa e os aspectos construtivos da estufa que minimizam a ação do vento e promovem uma uniformização da temperatura favorecem uma energia de mais qualidade do ponto de vista espectral. Dessa forma, os valores positivos do saldo de radiação no interior de uma estufa de polietileno permitem um ambiente adequado de energia disponível para manutenção do metabolismo vegetal, favorecendo o cultivo em todas as épocas do ano.

REFERÊNCIAS

AN, Ni; HEMMATI, Sahar; CUI, Yu-Jun. Assessment of the methods for determining net radiation at different time-scales of meteorological variables. **Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 239-246, abr. 2017.

ANDRADE, Antonio Marcos Delfino de; MOURA, Marcos Antonio Lima; SANTOS, Aurilene Barros dos; CARNEIRO, Rayonil Gomes; JUNIOR, Rosiberto Salustiano da Silva. Radiação Fotossinteticamente Ativa incidente e refletida acima e abaixo do dossel de floresta de Mata Atlântica em Coruripe, Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 68-79, mar. 2014.

ANDRADE, José Weselli de Sá; FARIAS JUNIOR, Max; SOUSA, Marliana Araújo de; ROCHA, Anísio Corrêa. Utilização de diferentes filmes plásticos como cobertura de abrigos para cultivo protegido. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [S.L.], v. 33, n. 3, p. 437-443, 22 jun. 2011.

ASSIS, Simone Vieira; ESCOBEDO, João Francisco. Influência do ângulo de elevação solar no albedo da cultura de alface (Lactuca sativa L.) medido em estufa de polietileno tipo túnel e externamente. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA**, 10, Piracicaba, 1997, p. 476-478.

BECKMANN, Márkilla Zunete; DUARTE, Georgea Rita Burck; PAULA, Viviane Aires de; MENDEZ, Marta Elena Gonzalez; PEIL, Roberta Marins Nogueira. Radiação solar em ambiente protegido cultivado com tomateiro nas estações verão-outono do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 36, n. 1, p. 86-92, fev. 2006.

BLAL, Mohamed; KHELIFI, Seyfallah; DABOU, Rachid; SAHOUANE, Nordine; SLIMANI, Abdeldjalil; ROUABHIA, Abdelkrim; ZIANE, Abderrezzaq; NEÇAIBIA, Ammar; BOURAIOU, Ahmed; TIDJAR, Boudjemaa. A prediction models for estimating global solar radiation and evaluation meteorological effect on solar radiation potential under several weather conditions at the surface of Adrar environment. **Measurement**, [S.L.], v. 152, p. 107348, fev. 2020.

BOWEN, Ira Sprague. The Ratio of Heat Losses by Conduction and by Evaporation from any Water Surface. **Physical Review**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 779-787, 1 jun. 1926.

BRUNT, David. Notes on radiation in the atmosphere. I. **Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society**, [S.L.], v. 58, n. 247, p. 389-420, out, 1932.

BURIOL, Galileo Adeli; STRECK, Nereu Augusto; PETRY, Cláudia; SCHNEIDER, Flavio Miguel. Transmissividade a radiação solar do polietileno de baixa densidade utilizado em estufas. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 25, n. 1, p. 1-4, 1995.

CARVALHO, Léa Araujo de; TESSARIOLI NETO, João. Produtividade de tomate em ambiente protegido, em função do espaçamento e número de ramos por planta. **Horticultura Brasileira**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 986-989, dez. 2005.

CHAVES, Matheus Andrade; ESCOBEDO, João Francisco. A software to process daily solar radiation data. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 19, n. 1-2, p. 339-344, jan. 2000

CODATO, Georgia; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; SOARES, Jacyra; ESCOBEDO, João Francisco; GOMES, Eduardo Nardini; PAI, Alexandre dal. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. **Theoretical And Applied Climatology**, [S.L.], v. 93, n. 1-2, p. 57-73, 23 out. 2007.

COSTA, Edilson; LEAL, Paulo Ademar Martins; SANTOS, Léia Carla Rodrigues dos; VIEIRA, Laura Caroline Rodrigues. Ambientes de cultivo, recipientes e substratos na produção de biomassa foliar e radicular em mudas de maracujazeiro amarelo em Aquidauana - MS. **Ciência e Agrotecnologia**, [S.L.], v. 34, n. 2, p. 461-467, abr. 2010

COSTA, Rosiani Castoldi da; CALVETE, Eunice Oliveira; REGINATTO, Flávio Henrique; CECCHETTI, Dileta; LOSS, Joana Tereza; RAMBO, Aline; TESSARO, Fernando. Telas de sombreamento na produção de morangueiro em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 98-102, mar. 2011.

CUNHA, Antonio Ribeiro da; ESCOBEDO, João Francisco. Alterações micrometeorológicas causadas pelo uso de estufa plástica e seus efeitos no crescimento e produção da cultura de pimentão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 15-26, 2003.

CUNHA, Antonio Ribeiro da; ESCOBEDO, João Francisco; KLOSOWSKI, Elcio Silvério. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 37, n. 6, p. 735-743, jun. 2002.

CUNHA, Antonio Ribeiro da; KLOSOWSKI, Élcio Silvério; GALVANI, Emerson; ESCOBEDO, João Francisco; MARTINS, Dinival. Classificação climática para o município de Botucatu, SP, segundo Köppen. In: **I SIMPÓSIO DE ENERGIA NA AGRICULTURA**, Botucatu. Anais. Botucatu, SP: UNESP, Faculdade de Ciências Agronômicas, 1999. vol. 2. p. 487-491.

DAI, Qiumin; FANG, Xiande. A new model for atmospheric radiation under clear sky condition at various altitudes. **Advances In Space Research**, [S.L.], v. 54, n. 6, p. 1044-1048, set. 2014.

DUARTE, Henrique Ferro; DIAS, Nelson Luís; MAGGIOTTO, Selma Regina. Assessing daytime downward longwave radiation estimates for clear and cloudy skies in Southern Brazil. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S.L.], v. 139, n. 3-4, p. 171-181, out. 2006.

ESCOBEDO, João Francisco ; RODRIGUES, Douglas; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; SOARES, Jacyra. Efeito da cobertura do céu no aumento das frações solar difusa e par-difusa em estufa de polietileno. In*:* VI CONGRESSO IBÉRICO DE AGRO-ENGENHARIA, Évora, **Anais [...]**, 2011, vol. 1.

ESCOBEDO, João Francisco; MELO, José Mário Domingues de ; FRISINA, Valéria de Almeida. Radiações Solar Global e Fração da Global Refletida em Estufa Tipo Túnel em Cobertura de Polietileno. In*: VII CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR,* VII Congresso Ibérico de Energia Solar. Energias Limpias en Progreso, Vigo, **Anais [...]**, 1994, vol. 1. p. 53-58.

FARIAS, José Renato Boucas; BERGAMASCHI, Homero; MARTINS, Sergio Roberto; BERLATO, Moacir Antonio Efeito da cobertura plástica de estufa sobre a radiação solar, **Revista Brasileira de Agrometeorologia***,* v.1, p, 31-36, 1993.

FATNASSI, Hicham; LEYRONAS, Christel; BOULARD, Thierry; BARDIN, Marc; NICOT, P.. Dependence of greenhouse tunnel ventilation on wind direction and crop height. **Biosystems Engineering**, [S.L.], v. 103, n. 3, p. 338-343, jul. 2009.

FRISINA, Valéria de Almeida; ESCOBEDO, João Francisco. Radiation and energy balance of lettuce culture inside a polyethylene greenhouse. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 34, n. 10, p. 1775-1786, out. 1999.

GALVANI, Emerson; ESCOBEDO, João Francisco; CUNHA, Antonio Ribeiro da; KLOSOWSKI, Elcio Silvério. Estimativa do índice de área foliar e da produtividade de pepino em meio protegido - cultivos de inverno e de verão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 4, n. 1, p. 8-13, abr. 2000.

GALVANI, Emerson; ESCOBEDO, João Francisco; PEREIRA, André Belmont. Balanço de radiação e fluxo de calor no solo em ambiente natural e protegido cultivado com pepineiro. **Bragantia**, [S.L.], v. 60, n. 2, p. 139-147, 2001.

GOLKAR, Foroogh; ROSSOW, William B.; SABZIPARVAR, Ali Akbar. Refining surface net radiation estimates in arid and semi-arid climates of Iran. **Advances In Space Research**, [S.L.], v. 61, n. 12, p. 2932-2941, jun. 2018.

GÓMEZ, Iván; PÉREZ-RODRÍGUEZ, Eduardo; VIÑEGLA, Benjamín; FIGUEROA, Félix L.; KARSTEN, Ulf. Effects of solar radiation on photosynthesis, UV-absorbing compounds and enzyme activities of the green alga Dasycladus vermicularis from southern Spain. **Journal Of Photochemistry And Photobiology B**: Biology, [S.L.], v. 47, n. 1, p. 46-57, nov. 1998.

GUTIÉRREZ-TRASHORRAS, Antonio José; VILLICAÑA-ORTIZ, Eunice; ÁLVAREZ-ÁLVAREZ, Eduardo; GONZÁLEZ-CABALLÍN, Juan Manuel; XIBERTA-BERNAT, Jorge; SUAREZ-LÓPEZ, María José. Attenuation processes of solar radiation. Application to the quantification of direct and diffuse solar irradiances on horizontal surfaces in Mexico by means of an overall atmospheric transmittance. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 81, p. 93-106, jan. 2018.

HELDWEIN, Arno Bernardo; STRECK, Nereu Augusto; STURZA, Vinícius Soares; LOOSE, Luis Henrique; ZANON, Alencar Junior; TOEBE, Marcos; SOUZA, André Trevisan de; PETERS, Marcelo Boschmann; KARLEC, Fábio. Plastocrono e rendimento de feijão-de-vagem cultivado sob ambiente protegido e no ambiente externo em semeadura tardia no outono. **Ciência Rural**, [S.L.], v. 40, n. 4, p. 768-773, 2 abr. 2010.

HOLCMAN, Ester; SENTELHAS, Paulo César. Microclimate under different shading screens in greenhouses cultivated with bromeliads. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 16, n. 8, p. 858-863, ago. 2012.

INÁCIO, Thais. **Potencial solar das radiações global, difusa e direta em Botucatu**. 2009. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Energia na Agricultura, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 2009.

KHOSHNEVISAN, Benyamin; RAFIEE, Shahin; MOUSAZADEH, Hossein. Environmental impact assessment of open field and greenhouse strawberry production. **European Journal Of Agronomy**, [S.L.], v. 50, p. 29-37, out. 2013.

LHOMME, Jean-Paul; VACHER, Jean Joinville; ROCHETEAU, Alain. Estimating downward long-wave radiation on the Andean Altiplano. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S.L.], v. 145, n. 3-4, p. 139-148, ago. 2007.

LI, Huawei; JIANG, Dong; WOLLENWEBER, Bernd; DAI, Tingbo; CAO, Weixing. Effects of shading on morphology, physiology and grain yield of winter wheat. **European Journal Of Agronomy**, [S.L.], v. 33, n. 4, p. 267-275, nov. 2010.

LIU, Peirong; TONG, Xiaojuan; ZHANG, Jinsong; MENG, Ping; LI, Jun; ZHANG, Jingru. Estimation of half-hourly diffuse solar radiation over a mixed plantation in north China. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 149, p. 1360-1369, abr. 2020.

MASIRI, Itsara; JANJAI, Serm; NUNEZ, Manuel; ANUSASANANAN, Panatcha. A technique for mapping downward longwave radiation using satellite and ground-based data in the tropics. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 103, p. 171-179, abr. 2017.

MOHAMMADI, Kasra; GOUDARZI, Navid. Study of inter-correlations of solar radiation, wind speed and precipitation under the influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) in California. **Renewable Energy**, [S.L.], v. 120, p. 190-200, maio 2018.

OBOT, Nsikan I.; CHENDO, Michael A.C.; OYEYEMI, Elijah O. Downward longwave radiation categories in Nigeria. **Dynamics Of Atmospheres And Oceans**, [S.L.], v. 83, p. 122-134, set. 2018.

PASHIARDIS, Stylianos; KALOGIROU, Soteris; PELENGARIS, A. Characteristics of longwave radiation through the statistical analysis of downward and upward longwave radiation and inter-comparison of two sites in Cyprus. **Journal Of Atmospheric And Solar-Terrestrial Physics**, [S.L.], v. 164, p. 60-80, nov. 2017.

PEDRO JÚNIOR, Mário José; HERNANDES, José Luiz; BARDIN-CAMPAROTTO, Ludmila; BLAIN, Gabriel Constantino. Balanço de energia e consumo hídrico de vinhedo de 'Cabernet Franc'. **Bragantia**, [S.L.], v. 74, n. 2, p. 234-238, abr. 2015.

PEREIRA, Antonio Roberto; GREEN, Steve; NOVA, Nilson Augusto Villa. Relationships between single tree canopy and grass net radiations. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S.L.], v. 142, n. 1, p. 45-49, jan. 2007.

PEZZOPANE, José Eduardo Macedo; PEDRO JÚNIOR, Mário José; ORTOLANI, Altino Aldo. Modificações microclimáticas provocadas por estufa com cobertura plástica. **Bragantia**, [S.L.], v. 54, n. 2, p. 419-425, 1995.

PINKER, Rachel; THOMPSON, O. E.; ECK, Thomas F. The albedo of a tropical evergreen forest. **Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society**, [S.L.], v. 106, n. 449, p. 551-558, jul. 1980.

POLLET, Ivan; PIETERS, Jan Ghent. Laboratory measurements of PAR transmittance of wet and dry greenhouse cladding materials. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S.L.], v. 93, n. 2, p. 149-152, fev. 1999.

RANA, Gianfranco; KATERJI, Nader. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. **European Journal Of Agronomy**, [S.L.], v. 13, n. 2-3, p. 125-153, jul. 2000

SANTOS, Léia Carla Rodrigues dos; COSTA, Edilson; LEAL, Paulo Ademarr Martins; NARDELLI, Evandro Michel Valero; SOUZA, Guilherme Sá de. Ambientes protegidos e substratos com doses de composto orgânico comercial e solo na formação de mudas de Jatobazeiro em Aquidauana-MS. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 31, n. 2, p. 249-259, abr. 2011.

SENTELHAS, Paulo César; VILLA NOVA, Nilson Augusto; ANGELOCCI, Luis Roberto. Efeito de diferentes tipos de cobertura em mini-estufas na atenuação da radiação solar e da luminosidade. In: *CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, Piracicaba-SP, Brasil:* **Sociedade Brasileira de Agrometeorologia**, 1997, vol. 10 p. 479-481.

SIMON, Jones; ANGELOCCI, Luiz Roberto. Saldo de radiação em cafeeiros e limeiras: relações com saldo de radiação de gramado e radiação global. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 18, n. 12, p. 1218-1227, dez. 2014.

SOUZA, Jorge Washington de; MARTINS, Dinival; CUNHA, Antonio Ribeiro da; ESCOBEDO, João Francisco; LUNARDI, Marco Antonio. Efeito do polietileno difusor de luz, sobre a radiação solar global, em ambiente protegido, **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** vol. 12, p, 211-217, 2004.

SOUZA, José Leonaldo; ESCOBEDO, João Francisco. Balanço de Radiação em Cultivos de Feijão Vagem em Casa de Vegetação com Cobertura de Polietileno e no seu Exterior, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, [S.L.], v. 32, p. 1-15, 1997.

SOUZA, Paulo Jorge de Oliveira Ponte de; RIBEIRO, Aristides; ROCHA, Edson José Paulino da; LOUREIRO, Renata Silva; BISPO, Carlos José Capela; SOUSA, Adriano Marlisom Leão. Albedo da cultura da soja em área de avanço da fronteira agrícola na Amazônia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 65-73, jan. 2010.

STEIDLE NETO, Antonio José; ZOLNIER, Sérgio; MAROUELLI, Waldir Aparecido; CARRIJO, Osmar Alves. Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 12, n. 6, p. 626-631, dez. 2008.

VILANI, Maricéia Tatiana; SANCHES, Luciana; PINHEIRO, Mariele Regina.; PINTO JUNIOR, Osvaldo Borges. Estimativa da radiação de onda longa incidente em uma floresta semidecídua tropical da Bacia Amazônica. **Ciência e Natura,** [S.L.], v. 32, p. 65 - 81, 2010.

WILSON, Tilden B.; MEYERS, Timothy P. Determining vegetation indices from solar and photosynthetically active radiation fluxes. **Agricultural And Forest Meteorology**, [S.L.], v. 144, n. 3-4, p. 160-179, jun. 2007

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide on the Global Observing and forecasting System.** Geneva, 2008.

ZHANG, Yongdong; LIN, Lin; LUO, Qing; CHEN, Min; DING, Yong; GAO, Yafeng; YU, Wei. Mathematical model for radiation energy from an urban surface penetrating the atmospheric infrared window. **Solar Energy**, [S.L.], v. 171, p. 197-211, set. 2018