

Análise estatística das frações espectrais da irradiação solar fotossinteticamente ativa global e difusa em função da cobertura de céu

Statistical analysis of spectral fractions of global and diffuse photosynthetically active solar irradiation according to sky coverage

José Rafael Franco^{1*}; Marcus Vinícius Contes Calça¹; Victor Crespo de Oliveira; Matheus Rodrigues Raniero²; Takeshi Koizume Filho¹; Leonardo França da Silva³, Fábio Ryu Nakasone¹; Alexandre Dal Pai¹

¹ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) – São Paulo – Brasil;

² Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) – São Paulo – Brasil;

³ Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária (FAV) – Distrito Federal – Brasil.

*Autor correspondente. E-mail: jose_rafael.franco@hotmail.com

Recebido: 26/02/2025; Aceito: 06/02/2026

RESUMO

A radiação solar fotossinteticamente ativa, compreendida no intervalo de comprimento de onda de 400 nm a 700 nm (espectro visível), é a componente da radiação solar de maior interesse para a área agronômica, pois está diretamente relacionada ao processo de fotossíntese, à modelagem de processos vegetais, à produção de biomassa e à iluminação natural no interior de estufas. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise dos valores energéticos das irradiações solares global, difusa, fotossinteticamente ativa global e fotossinteticamente ativa difusa, calcular as frações solares da fotossinteticamente ativa global e da fotossinteticamente ativa difusa na partição de tempo diária, além de explorar o comportamento sazonal dos valores dessas componentes da radiação solar. Foram utilizados dados de 2 anos (2000 e 2001) das irradiações solares globais, difusa, fotossinteticamente ativa global e fotossinteticamente ativa difusa, mensuradas pelo Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP de Botucatu (SP). Os valores médios encontrados para o período em questão foram de 18,25 MJ/m² para a irradiação solar global, de 6,39 MJ/m² para a irradiação solar difusa, de 8,47 MJ/m² para a irradiação solar fotossinteticamente ativa global e de 2,5 MJ/m² para a irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa. Em relação às frações espectrais solares, em média, a irradiação solar fotossinteticamente ativa global corresponde a 46,8% da irradiação solar global total e a irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa corresponde a 44,0% da irradiação solar difusa total. As irradiações solares fotossinteticamente ativa global e difusa apresentaram dependência sazonal e da cobertura de céu.

Palavras-chave: Radiação solar, Fotossinteticamente ativa (PAR), Radiação solar global, Radiação solar difusa.

ABSTRACT

Photosynthetically active solar radiation, ranging from 400 nm to 700 nm in wavelength (visible spectrum), is the component of solar radiation of greatest interest to the agronomic field, as it is directly related to the process of photosynthesis, the modeling of plant physiological processes, biomass production, and natural lighting inside greenhouses. In this context, the objective of this study was to analyze the energy values of global, diffuse, photosynthetically active global, and photosynthetically active diffuse solar irradiance, calculate the solar fractions of photosynthetically active global and photosynthetically active diffuse irradiance in the daily time partition, and to explore the seasonal behavior of the values of these components of solar radiation. Data from two years (2000 and 2001) of global, diffuse, photosynthetically active global, and photosynthetically active diffuse solar irradiance, measured by the Solar Radiometry Laboratory of the School of Agricultural Sciences – UNESP in Botucatu (SP), were used. The average values found for the analyzed period were 18.25 MJ/m² for global solar irradiance, 6.39 MJ/m² for diffuse solar irradiance, 8.47 MJ/m² for photosynthetically active global solar irradiance, and 2.5 MJ/m² for photosynthetically active diffuse solar irradiance. Regarding the solar spectral fractions, on average, photosynthetically active global solar irradiance corresponds to 46.8% of the total global solar irradiance, and photosynthetically active diffuse solar irradiance corresponds to 44.0% of the total diffuse solar irradiance. Both photosynthetically active global and diffuse solar irradiance components showed seasonal dependence and sensitivity to sky cover.

Keywords: Solar radiation; Photosynthetically active (PAR); Global solar radiation; Diffuse solar radiation.

INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre o potencial da radiação solar disponível na superfície terrestre é essencial para órgãos públicos, instituições acadêmicas e organizações não governamentais compreenderem melhor os processos físicos, biológicos e químicos, como a fotossíntese vegetal, a evapotranspiração e o crescimento de culturas. Além de ser um parâmetro fundamental para a avaliação de riscos de incêndios florestais, modelos de simulação hidrológica e modelos matemáticos de simulação de processos naturais (Jatobá; Silva, 2020; Samanta Nato *et al.*, 2023). Ao penetrar na atmosfera terrestre, a radiação solar interage com seus constituintes por meio dos processos físicos de absorção, reflexão e espalhamento, e o montante disponível para uso é conhecido como radiação solar global, que se estende desde a luz ultravioleta (UV), com comprimento de onda entre 300 nm e 400 nm; fotossinteticamente ativa (PAR), com comprimento de onda entre 400 nm e 700 nm; até a infravermelha próxima ao espectro visível (IVP), com comprimento de onda entre 700 nm e 5000 nm (Gomes *et al.*, 2018; Rossi *et al.*, 2018).

A radiação solar global pode ser particionada em direta e difusa, de acordo com a sua interação com os constituintes atmosféricos. Neste sentido, a radiação solar direta corresponde à parcela da global que não sofreu atenuação pelos processos físicos de absorção, reflexão ou espalhamento na atmosfera terrestre. Por outro lado, a radiação solar difusa representa a parcela da global que foi atenuada pelos constituintes atmosféricos (vapor d'água, aerossóis e nuvens) e é composta pelos espalhamentos *Rayleigh*, causado por gases cujos tamanhos são da ordem de 10% do comprimento de onda da radiação solar incidente, e *Mie*, provocado por partículas com dimensões semelhantes ao comprimento de onda da radiação solar incidente (Iqbal, 1983; Pereira, *et al.*, 2017).

A componente espectral fotossinteticamente ativa da radiação solar global, é responsável por ativar os pigmentos fotossintéticos nas plantas, permitindo que absorvam a energia solar e a convertam em energia química (transformação de água e dióxido de carbono em glicose) por meio do processo de fotossíntese (Xiao *et al.*, 2022). Portanto, o conhecimento dos seus níveis de incidência no dossel vegetativo contribui para o entendimento e modelagem de processos de respiração, evapotranspiração e estresse hídrico vegetal (Lemainski *et al.*, 2023),

assim como, está diretamente relacionada a produção de biomassa e iluminação natural de estufas agrícolas (Rodríguez *et al.*, 2021). Além disso, possuem influência em técnicas de modelagem agrometeorológica, planejamento da irrigação agrícola, avaliação do rendimento do processo produtivo e estudos do balanço de energia na superfície terrestre (Escobedo *et al.*, 2011).

Considerando que a cobertura de nuvens é o principal fator de modulação da radiação solar que chega à superfície terrestre, afetando tanto a componente direta quanto a difusa, além da influência de aerossóis e gases atmosféricos (Pereira *et al.*, 2017), é esperado que o padrão de nebulosidade exerça também influência sobre a proporção de irradiação solar fotossinteticamente ativa disponível para os processos biológicos. Em dias nublados, a dispersão da luz por aerossóis e gotículas de água tende a aumentar a contribuição da radiação solar difusa, enquanto em condições de céu limpo prevalece a radiação solar direta, elevando a fração da fotossinteticamente ativa global incidente sobre a vegetação (Lozano *et al.*, 2022). Portanto, o objetivo deste estudo foi realizar uma análise estatística dos níveis energéticos, calcular as frações e explicar as diferenças sazonais das frações das irradiações solares fotossinteticamente ativa global e difusa na escala temporal diária, em função do padrão de cobertura de céu (nebulosidade).

MATERIAL E MÉTODOS

Localização e clima

O estudo utilizou medidas de radiação solar obtidas pelo Laboratório de Radiometria Solar ($22^{\circ}54'S$ de latitude, $48^{\circ}27'W$ de longitude e 786m de altitude), situado no Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP de Botucatu - São Paulo, Brasil (Figura 1).

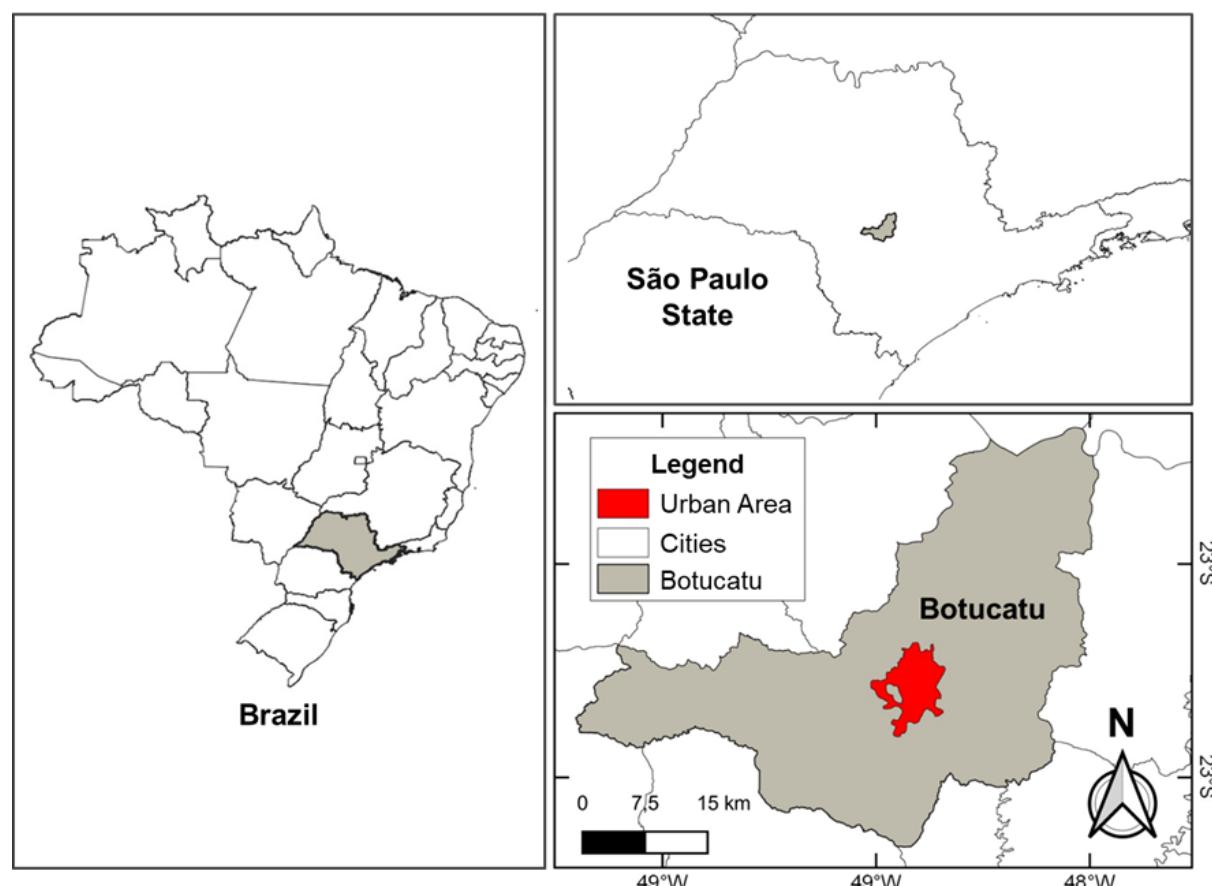
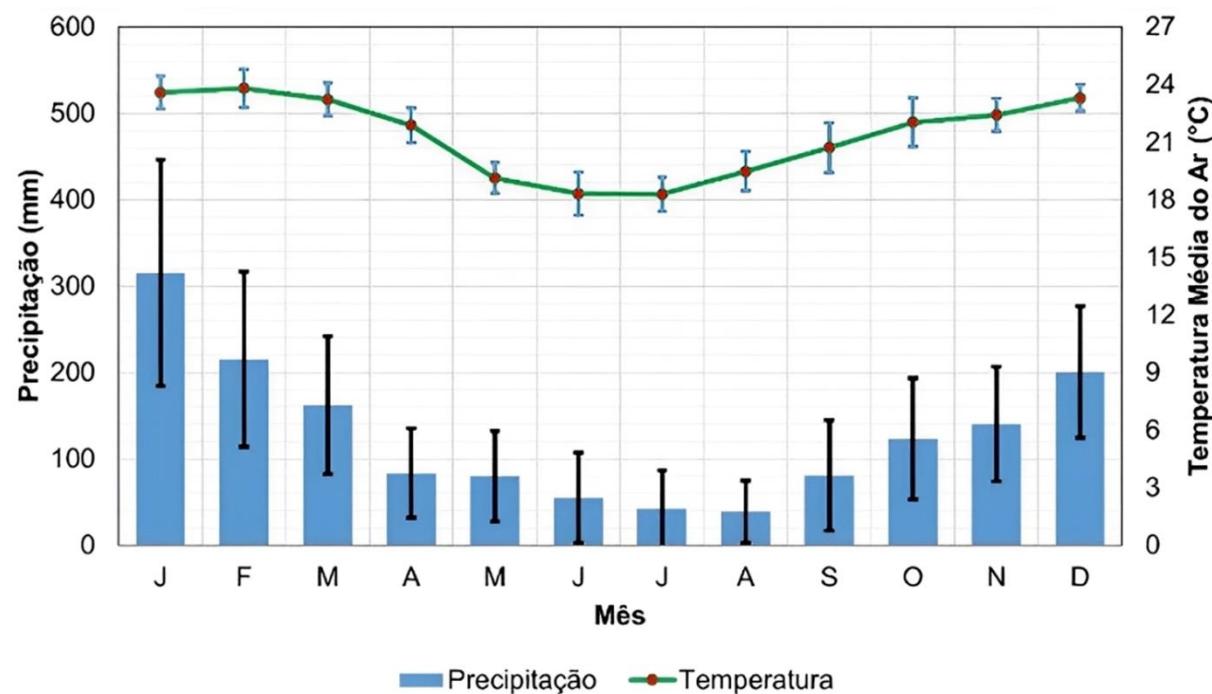


Figura 1 - Município de Botucatu - São Paulo - Brasil.

Segundo Franco *et al.*, (2023), e de acordo com os critérios de classificação climática de Köppen, o clima de Botucatu é classificado como Aw (savana tropical), caracterizado por um verão quente e chuvoso e um inverno frio e seco. As normais climatológicas identificadas no período de 1991 a 2020 (Figura 2) indicam temperaturas do ar médias mínima de 17,24°C, média de 21,34°C e média máxima de 26,51°C. A umidade relativa do ar apresenta um valor médio de 70% no ano, sendo a precipitação acumulada anual de aproximadamente 1500 mm, ocorrendo, em média, 107 dias do ano.

**Figura 2** - Classificação climática (Aw) do município de Botucatu - SP de 1991 a 2020 (Franco *et al.*, 2023).

O mês com maior volume de chuva ocorre no verão, em janeiro, com precipitação de 315,14 mm e umidade relativa do ar de 75,76%, assim como o mês mais quente, de fevereiro, com temperatura do ar média de 23,80 °C. O mês mais seco ocorre no inverno, em agosto, com precipitação de 38,60 mm e umidade relativa do ar de 61,87%, assim como o mês mais frio, em junho, com temperatura do ar média de 18,31 °C.

Instrumentos de aquisição de dados

No estudo foram utilizadas medidas de 2000 e 2001 (2 anos) das irradiação solar global, difusa, fotossinteticamente ativa global e fotossinteticamente ativa difusa mensuradas pelo Laboratório de Radiometria Solar (22°54'S de latitude, 48°27'W de longitude e 786m de altitude) da Faculdade de Ciências Agronômicas - UNESP de Botucatu, São Paulo, Brasil. Embora os dados utilizados neste estudo sejam referentes aos anos de 2000 e 2001, sua relevância permanece atual devido à escassez de séries temporais da radiação solar fotossinteticamente ativa global e difusa obtidas a partir de medições direta e de qualidade, devido a dificuldades instrumentais (aquisição, instalação, calibração e manutenção) no monitoramento terrestre da radiação solar. Portanto, apesar da defasagem temporal, os dados em questão apresentam um elevado padrão de qualidade e

representam uma das poucas séries temporais disponíveis com essa especificidade espectral e temporal para o município de Botucatu e região.

A irradiação solar global foi medida por um piranômetro da Eppley modelo PSP. A irradiação solar difusa foi medida por um piranômetro da Eppley modelo PSP, posicionado sob a sombra de um anel de sombreamento de Melo-Escobedo com 10 cm de largura e 40 cm de raio. A irradiação solar fotossinteticamente ativa global foi medida por um piranômetro quântico da Kipp & Zonen. A irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa foi medida por um piranômetro quântico da Kipp & Zonen, posicionado sob a sombra de um anel de sombreamento de Melo-Escobedo com 10 cm de largura e 40 cm de raio. A Figura 3 apresenta o campo experimental onde os instrumentos de monitoramento das irradiações solares global, difusa, fotossinteticamente ativa global e fotossinteticamente ativa difusa estavam instalados durante o período de obtenção dos dados.



Figura 3 - Instrumentos de aquisição de medidas das irradiações solares.

Os valores das irradiações solares foram monitorados por um dispositivo eletrônico de aquisição automática de dados (datalogger), modelo 23X da Campbell Scientific, com frequência de varredura dos sinais de 0,2 Hz (a cada 5 segundos) e armazenamento na memória interna. A cada varredura, os sinais analógicos dos sensores eram registrados em milivolts (mV). Após completar um período de 5 minutos (60 medidas capturadas), os valores médios eram calculados e convertidos para W/m² por meio do fator de calibração do instrumento.

Processamento de dados

O método do anel de sombreamento de Melo-Escobedo além de bloquear a irradiância solar direta, também bloqueia uma parcela da irradiância solar difusa, devido às suas dimensões, o que torna necessário um processo de correção das medidas obtidas a partir dele para compensar essa parcela de irradiância solar difusa perdida. Nesse sentido, os valores gravados a cada 5 minutos (W/m^2) das irradiâncias solares difusa e fotossinteticamente ativa difusa foram corrigidos usando os fatores de correção geométrica de Oliveira et al. (2002), dado pelas Equações 1 e 2 que usam as dimensões do instrumento como parâmetro de ajuste, e os fatores de correção atmosférica de Dal Pai et al. (2016), que usa a transmissividade atmosférica como parâmetro de ajuste, considerando a influência da cobertura do céu nas medidas da irradiância solar difusa.

$$FC = \frac{1}{1 - F_p} \quad (1)$$

$$F_p = \left(\frac{2b}{\pi R} \right) \cdot \cos(\delta) \cdot \left(\frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right)^2 \int_0^{w_s} \cos(\theta_z) dw \quad (2)$$

onde b é a largura do anel de sombreamento (m), R é o raio do anel de sombreamento (m), δ é a declinação solar (graus), ϕ é a latitude do local (graus), w é o ângulo horário do pôr-do-sol (graus) e θ_z é o ângulo zenital (graus), F_p é a fração de perda devido ao anel de sombreamento e FC é o fator de correção geométrico aplicado. Os valores das efemérides geospeciais utilizados (declinação solar, ângulo horário de pôr-do-sol e ângulo zenital) foram obtidos de acordo com as expressões matemáticas propostas por Iqbal (1983).

Após a correção das medições de irradiância solar difusa e fotossinteticamente ativa difusa, foram aplicados filtros computacionais de verificação da qualidade dos dados, com frequência temporal de 5 minutos (valores em W/m^2), com o objetivo de eliminar registros inconsistentes decorrentes de falhas instrumentais ou operacionais. De acordo com o procedimento descrito por Calça et al. (2019), foram descartados vetores de dados que apresentassem, em qualquer uma das quatro componentes da irradiância solar mensuradas, os seguintes critérios de invalidação:

- Valores nulos;
- Valores negativos;
- Valores superiores a 120% da irradiância solar extraterrestre no caso da global;
- Valores superiores a 80% da irradiância solar extraterrestre no caso da difusa.

Como os valores das irradiâncias solares foram registrados como médias em intervalos de 5 minutos, após a realização da checagem de qualidade foi feita a conversão de W/m^2 (potência solar instantânea) para MJ/m^2 (energia solar acumulada) foi realizada pela multiplicação de cada valor por 300 segundos (correspondente a 5 minutos), resultando em valores energéticos, tecnicamente denominados de irradiação solar. Em seguida, os resultados foram divididos por 10^6 para a conversão de joules para megajoules. A Tabela 1 apresenta um esquema de 3 passos executados para a conversão de cada um dos valores de W/m^2 para MJ/m^2 obtidos.

Tabela 1 - Classificação de cobertura de céu conforme a Transmissividade Atmosférica (KT).

1º	Transformação dos minutos em segundos	2º	Conversão da irradiância solar para irradiação solar	3º	Conversão dos valores para megajoules
	5 minutos x 60 = 300 segundos		600 W/m ² x 300 s = 180000 J/m ²		$\frac{180000}{10^6} = 0,18 \text{ MJ/m}^2$

A partir da conversão das irradiâncias solares (W/m²) para irradiações solares (MJ/m²), foi feita a soma dos registros dentro de cada hora, que resultou em valores horários, depois a soma dos valores horários para o período de um dia que gerou os valores diários das irradiações solares global, difusa, fotossinteticamente ativa global e fotossinteticamente ativa difusa. Por fim, os valores diários foram agrupados para o período de um mês, e foi calculada a média de cada agrupamento, originando os valores médios-mensais utilizados no estudo.

Técnicas de análise de dados

A análise dos dados de irradiação solar global, difusa, fotossinteticamente ativa global e fotossinteticamente ativa difusa foi conduzida com o objetivo de compreender a sazonalidade, o comportamento das medidas das componentes solares associados à cobertura de céu e o comportamento das frações solares fotossinteticamente ativas global e difusa por meio de métodos estatísticos e gráficos exploratórios.

a. Análise estatística da série temporal

A fim de investigar a variação das irradiações solares ao longo do tempo, foram elaborados gráficos temporais com a distribuição dos pontos de medidas das componentes solares global, difusa, fotossinteticamente ativa global e fotossinteticamente ativa difusa. Além disso, foi utilizada uma regressão linear simples como método para avaliar a relação entre as irradiações solares global e fotossinteticamente ativa global, bem como entre as irradiações solares difusa e fotossinteticamente ativa difusa. Também foram calculadas estatísticas descritivas (mínimo, máximo, média e desvio padrão) para cada componente da irradiação solar para o conjunto de dados obtido, permitindo caracterizar a distribuição e a variabilidade dos dados mensurados.

b. Análise estatística em função da cobertura de céu

A transmissividade atmosférica (K_T) é a razão entre a irradiação solar global (H_G) e a irradiação solar extraterrestre (H_O) e foi calculada usando a Equação 3. A irradiação solar extraterrestre é a intensidade da radiação solar disponível no topo da atmosfera, caso não houvesse nenhuma interferência da atmosfera terrestre, e foi obtida de acordo com os cálculos de Iqbal (1983).

$$K_T = \frac{H_G}{H_O} \quad (3)$$

Os critérios de classificação de céu baseados na transmissividade atmosférica considerados neste estudo estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação da cobertura de céu de acordo com o índice de transmissividade atmosférica (K_T).

Transmissividade Atmosférica	Cobertura de Céu
$0 < K_T < 1$	Condições Totais
$0 \leq K_T < 0,30$	Nublado
$0,30 \leq K_T < 0,65$	Parcialmente Nublado
$0,65 \leq K_T < 1$	Aberto

Fonte: Liu e Jordan (1960).

Também foram calculadas estatísticas descritivas (mínimo, máximo, média e desvio padrão) para cada componente da irradiação solar de acordo com a cobertura de céu obtida a partir do índice de transmissividade atmosférica, permitindo caracterizar a distribuição e a variabilidade dos dados mensurados em relação ao padrão de nebulosidade.

c. Análise estatística das frações solares

As medidas de irradiação solar (MJ/m^2) são influenciadas por fatores sazonais e astronômicos, como o ângulo zenital, o fotoperíodo e a declinação solar ao longo do ano. Ao realizar uma análise estatística considerando apenas os valores absolutos da irradiação solar fotossinteticamente ativa global e difusa, as variações observadas podem refletir apenas a flutuação da irradiação solar total incidente na superfície terrestre, sem necessariamente indicar alterações reais na proporção de energia fotossinteticamente ativa útil. Nesse contexto, o uso de frações permite normalizar o efeito da irradiação solar total, revelando proporções mais estáveis e comparáveis das componentes fotossinteticamente ativas (global e difusa) em relação às componentes solares tradicionais (global e difusa), independentemente da época do ano ou da intensidade absoluta da irradiação solar. Sendo assim, as frações fotossinteticamente ativa global (PAR_G) e difusa (PAR_D) são expressas pelas Equações 4 e 5.

$$\text{KPAR}_G = \frac{\text{PAR}_G}{H_G} \quad (4)$$

$$\text{KPAR}_D = \frac{\text{PAR}_D}{H_D} \quad (5)$$

As frações das irradiações solares foram analisadas em relação as diferentes condições de cobertura de céu (nublado, parcialmente nublado e céu aberto), com o objetivo de investigar sua dependência em relação às condições atmosféricas. Além disso, foram calculadas estatísticas descritivas para caracterizar a distribuição das irradiações solares (mínimo, máximo, média e desvio padrão).

RESULTADOS

Análise estatística da série temporal

A Figura 4a apresenta a série temporal diária da irradiação solar global e da irradiação solar fotossinteticamente ativa global ao longo do período de coleta de dados (janeiro de 2000 e dezembro de 2001). É possível perceber que ambas as medidas de irradiação solar acompanham um padrão sazonal com flutuações regulares ao longo do tempo, compreendendo maiores valores no período do verão/primavera e menores valores

no período do inverno/outono. A fotossinteticamente ativa global mantém um comportamento semelhante ao da global, com valores inferiores que refletem sua natureza espectral, restrita à faixa de 400 a 700 nm da luz solar. A Figura 4b apresenta a correlação entre a irradiação solar global e a irradiação solar fotossinteticamente ativa global por meio de um gráfico de dispersão com um ajuste linear simples, para demonstrar a relação entre as duas medidas de irradiação solar. O coeficiente de correlação de Pearson (R) obtido foi de 0,9460, o que indica uma correlação linear forte, positiva e relativamente constante, entre as irradiações solares. Isso significa que à medida que os valores da global aumentam os valores da fotossinteticamente ativa global também tendem a aumentar.

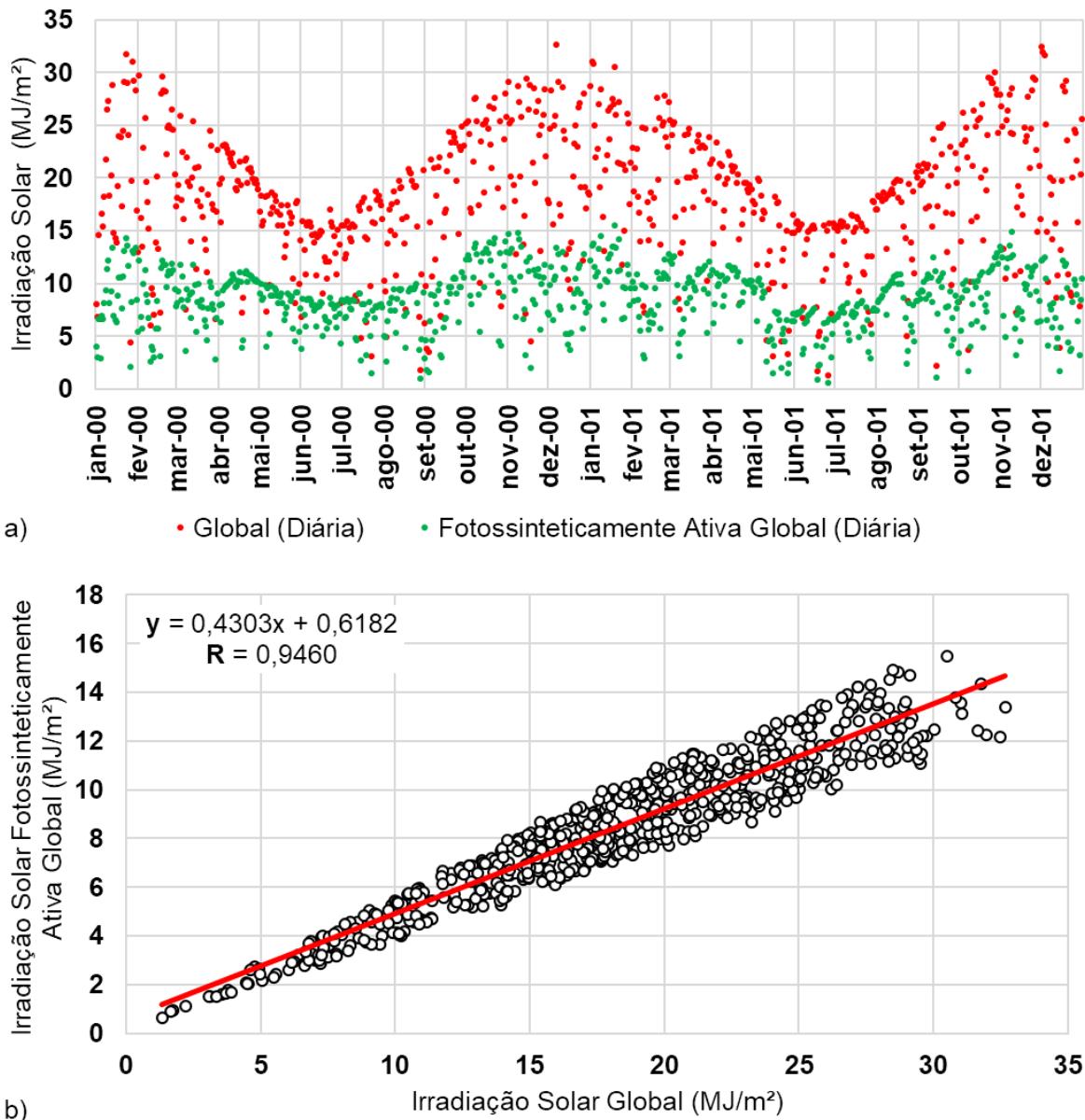


Figura 4 - Comparação e correlação da irradiação solar fotossinteticamente ativa global com a irradiação solar global para toda a série temporal de dados.

A Figura 5a apresenta a série temporal diária da irradiação solar difusa e da irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa ao longo do período de coleta de dados (janeiro de 2000 a outubro de 2001).

Ambas as irradiações solares exibem flutuações ao longo do tempo com maior variabilidade nos meses com maior presença de nebulosidade, principalmente no verão. A fotossinteticamente ativa difusa acompanha a tendência da difusa, com valores relativamente inferiores, em razão de sua limitação espectral à faixa de 400 a 700 nm da luz solar. É importante destacar também que nos meses de novembro e dezembro de 2001 as medidas da fotossinteticamente ativa difusa foram removidas da base de dados devido a falhas instrumentais ou operacionais na aplicação dos filtros de controle de qualidade, por isso percebe-se uma lacuna nos pontos de dados.

A Figura 5b apresenta a correlação entre a irradiação solar difusa e a fotossinteticamente ativa difusa, representada por um gráfico de dispersão com ajuste linear simples, para demonstrar a relação entre as duas medidas de irradiação solar. O coeficiente de correlação de Pearson (R) obtido foi de 0,9707, indicando uma correlação linear forte e positiva entre as irradiações solares. Esse valor é ligeiramente superior ao observado na correlação entre a global e a fotossinteticamente ativa global ($R = 0,9460$), sugerindo uma associação ainda mais consistente entre as irradiações solares difusas. Observa-se no gráfico de dispersão que os pontos estão mais concentrados ao longo da linha ajustada, com menor dispersão lateral, o que evidencia uma relação mais linear e homogênea entre as irradiações difusas ao longo da série temporal.

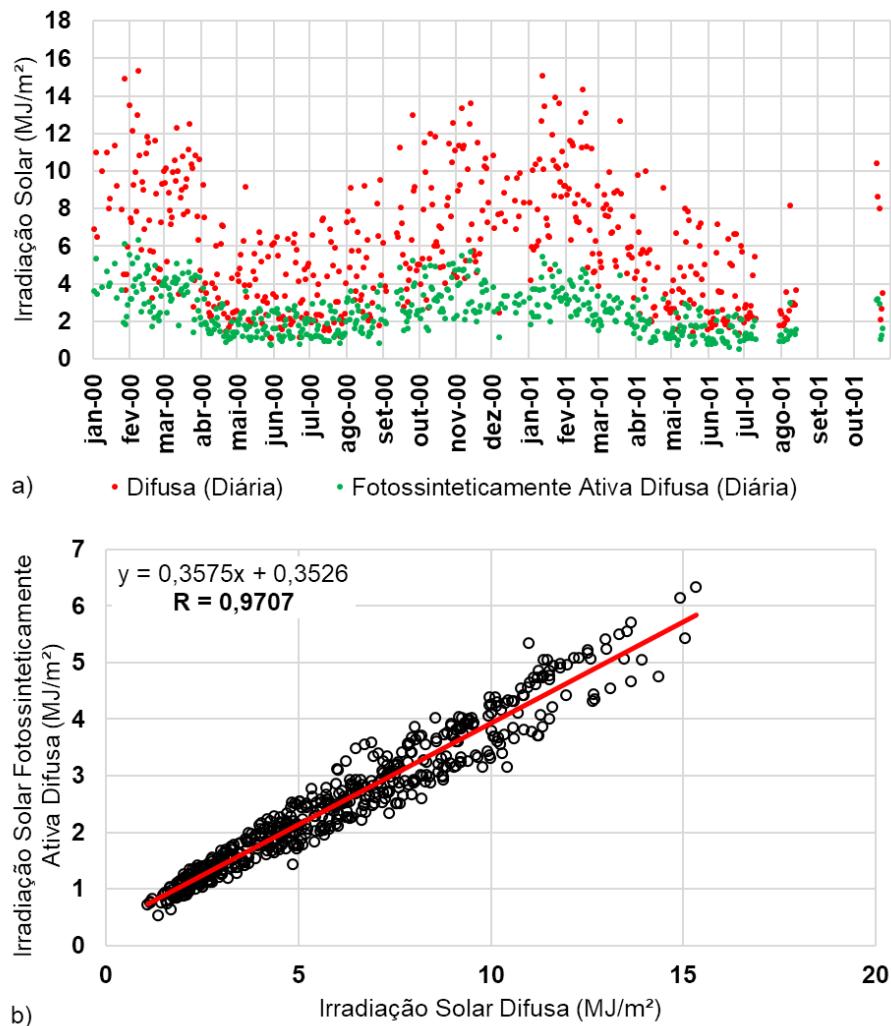


Figura 5 - Comparação e correlação da irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa com a irradiação solar difusa para toda a série temporal de dados.

A Figura 6 apresenta a variação diária das irradiações solares ao longo do período de coleta de dados (janeiro de 2000 a outubro de 2001), incluindo a irradiação solar extraterrestre, calculada de acordo com Iqbal (1983), e as medidas obtidas na superfície terrestre (global, fotossinteticamente ativa global, difusa e fotossinteticamente ativa difusa). Observa-se novamente um comportamento sazonal bem definido para todas as irradiações solares, com valores mais elevados nos meses de verão/primavera e menores valores nos meses de inverno/outono. A extraterrestre apresenta um padrão suave e simétrico ao longo do ano, com variação exclusivamente determinada por fatores astronômicos, como a declinação solar e o fotoperíodo. Já as demais irradiações solares, que sofrem atenuação de acordo com sua interação com os constituintes atmosféricos, exibem maior dispersão nos pontos de dados, refletindo a variabilidade local de cobertura de nuvens, presença de aerossóis e outras condições atmosféricas (Dal Pai *et al.*, 2016).

A irradiação solar global distribui-se abaixo da curva formada pelos pontos de dados da extraterrestre, apresentando maior variabilidade nos períodos de transição sazonal. A irradiação solar difusa mostra maior densidade de pontos em valores baixos, mas com ocorrência de picos pontuais ao longo de todo o período de coleta de dados, o que sugere uma forte influência de dias nublados. As componentes espectrais fotossinteticamente ativas global e difusa mantêm um padrão semelhante às suas respectivas irradiações solares totais (global e difusa), com menor amplitude e distribuição dos pontos de dados mais concentrada. Observa-se ainda a ausência de dados de fotossinteticamente ativa difusa (PARd) nos meses de novembro e dezembro de 2001, devido à ocorrência de falhas instrumentais e operacionais. A relação visual observada nos pontos de dados entre a global e a difusa sugere a predominância da irradiação solar direta em períodos de céu aberto e maior participação da difusa em períodos de maior nebulosidade.

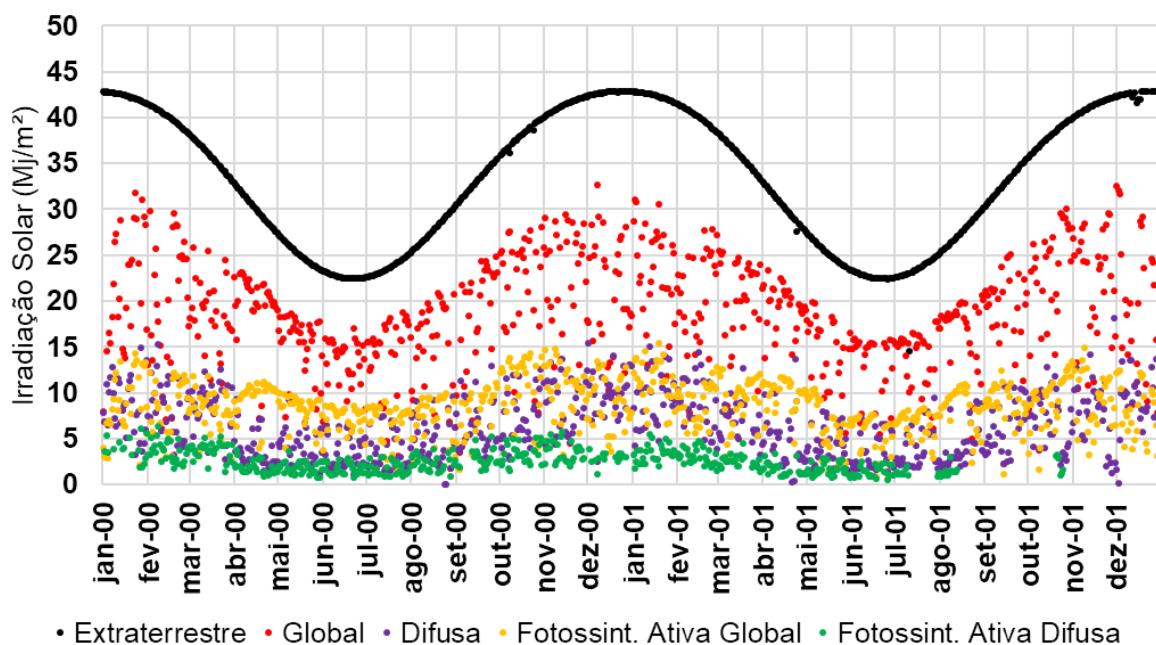


Figura 6 - Irradiações solares diárias no decorrer da série temporal de dados (2000 e 2001).

A Tabela 3 apresenta as estatísticas descritivas das irradiações solares no decorrer de janeiro de 2000 a outubro de 2001. A irradiação solar global apresentou média de 18,25 MJ/m², com desvio padrão de 6,21 MJ/m², e valores

variando entre 1,34 e 32,67 MJ/m², o que deixa claro a forte influência das condições atmosféricas do local sobre ela. A irradiação solar difusa apresentou média de 6,39 MJ/m², com desvio padrão de 3,42 MJ/m², e amplitude de 0,77 a 18,10 MJ/m², indicando a ocorrência de dias com predominância da difusão da luz solar, especialmente sob céu nublado. A irradiação solar fotossinteticamente ativa global apresentou média de 8,47 MJ/m², com desvio padrão de 2,83 MJ/m² e variação de 0,63 a 15,47 MJ/m². Já a irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa apresentou média de 2,50 MJ/m², desvio padrão de 1,19 MJ/m² e valores entre 0,53 e 6,34 MJ/m².

Embora apresentem menor magnitude absoluta dos valores mensurados em comparação às componentes solares totais, as irradiações solares fotossinteticamente ativas são fundamentais para os processos de conversão de energia solar em biomassa. Esses níveis energéticos médios encontrados, aliados à ampla variabilidade observada nos valores, são relevantes para a região estudada, caracterizada por culturas agrícolas de alta demanda luminosa, como a cana-de-açúcar e o eucalipto. O detalhamento estatístico das irradiações solares contribui diretamente para o aprimoramento de modelos agrometeorológicos, permitindo estimativas mais precisas da produtividade vegetal e da eficiência na utilização da irradiação solar fotossinteticamente ativa disponível.

Tabela 3 - Estatísticas descritivas das irradiações solares (MJ/m²).

Irradiação Solar (MJ/m ²)	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Extraterrestre	33,464	7,284	14,524	42,877
Global	18,249	6,212	1,339	32,669
Difusa	6,386	3,416	0,769	18,095
Fotossinteticamente Ativa Global	8,474	2,826	0,629	15,467
Fotossinteticamente Ativa Difusa	2,498	1,185	0,527	6,339

Análise estatística em função da cobertura de céu

Pelos valores apresentados nas Tabelas 4, 5 e 6, nota-se que à medida que a cobertura de céu evolui de nublada para aberta, os valores médios das irradiações solares global e fotossinteticamente ativa global aumentam, enquanto os valores médios das irradiações solares difusa e fotossinteticamente ativa difusa diminuem. Esse comportamento está diretamente relacionado à presença de nuvens na atmosfera terrestre, uma vez que elas reduzem o total de energia solar direta incidente na superfície terrestre, afetando as medidas da irradiação solar global, porém aumentam o espalhamento dos raios solares, o que favorece os valores da irradiação solar difusa. Esse mesmo comportamento pode ser observado nas irradiações solares fotossinteticamente ativas global e difusa.

Nos dias de céu nublado (Tabela 4), a irradiação solar global apresentou média de 7,08 MJ/m² com desvio padrão de 2,64 MJ/m², enquanto a fotossinteticamente ativa global apresentou média de 3,28 MJ/m² com desvio padrão de 1,23 MJ/m². Já a irradiação solar difusa, predominante sob essa condição de nebulosidade, registrou média de 6,50 MJ/m² com desvio padrão de 2,49 MJ/m², sendo praticamente equivalente à irradiação solar global, e a irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa registrou 2,43 MJ/m² com desvio padrão de 0,86 MJ/m². Esses valores indicam que, sob forte nebulosidade, a maior parte da irradiação solar que atinge a superfície terrestre é do tipo difusa, resultado do espalhamento da irradiação solar pelas nuvens e demais componentes atmosféricos.

Tabela 4 - Estatísticas descritivas das irradiações solares (MJ/m²) em céu nublado.

Irradiação Solar (MJ/m ²)	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Extraterrestre	34,334	7,480	22,360	42,875
Global	7,075	2,642	1,339	12,776
Difusa	6,503	2,493	0,369	10,911
Fotossinteticamente Ativa Global	3,277	1,232	0,629	6,645
Fotossinteticamente Ativa Difusa	2,433	0,860	0,527	3,970

Em condições de céu parcialmente nublado (Tabela 5), ocorre uma transição entre os dois comportamentos extremos (condições de céu nublado e aberto). A irradiação solar global registrou um aumento dos valores em relação a condição de cobertura de céu nublado, com uma média de 17,77 MJ/m² e um desvio padrão de 4,78 MJ/m², e a fotossinteticamente ativa global registrou uma média de 8,18 MJ/m² e um desvio padrão de 2,18 MJ/m². A irradiação solar difusa também aumentou seus valores absolutos, registrando uma média de 8,42 MJ/m² e um desvio padrão de 2,99 MJ/m² em relação a condição de céu nublado, mas passa a representar uma fração menor da irradiação solar global, evidenciando o maior aporte da irradiação solar direta. A fotossinteticamente ativa difusa registrou uma média de 3,21 MJ/m², com um desvio padrão de 1,10 MJ/m².

Tabela 5 - Estatísticas descritivas das irradiações solares (MJ/m²) em céu parcialmente nublado.

Irradiação Solar (MJ/m ²)	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Extraterrestre	34,967	7,228	22,429	42,877
Global	17,774	4,775	7,185	27,343
Difusa	8,424	2,990	0,300	18,095
Fotossinteticamente Ativa Global	8,180	2,182	3,007	14,218
Fotossinteticamente Ativa Difusa	3,208	1,103	1,045	6,339

Em dias de céu aberto (Tabela 6), observa-se uma maior porção de irradiação solar disponível na superfície terrestre, devido a menor presença de nuvens e de outros componentes atmosféricos. Neste caso, em condições de céu aberto a irradiação solar global registrou uma média de 21,73 MJ/m² com um desvio padrão de 4,86 MJ/m², e a fotossinteticamente ativa global aumentou, em relação às condições de céu parcialmente nublado, para 10,20 MJ/m² com um desvio padrão de 2,00 MJ/m². Em contraste, a irradiação solar difusa reduziu, registrando uma

média de 3,68 MJ/m², com um desvio padrão de 1,79 MJ/m², assim como fotossinteticamente ativa difusa, que apresentou uma média de 1,64 MJ/m² e um desvio padrão de 0,66 MJ/m². Os dados obtidos na superfície terrestre corroboram a visão de que sob uma menor influência de nuvens, a maior parte da irradiação solar é do tipo direta, reduzindo a fração difusa e suas respectivas contribuições fotossinteticamente ativas.

Tabela 6 - Estatísticas descritivas das irradiações solares (MJ/m²) em céu aberto.

Irradiação Solar (MJ/m ²)	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
Extraterrestre	31,214	6,811	14,524	42,870
Global	21,726	4,861	10,106	32,669
Difusa	3,678	1,791	0,000	8,958
Fotossinteticamente Ativa Global	10,197	1,995	5,360	15,467
Fotossinteticamente Ativa Difusa	1,641	0,660	0,725	3,882

Análise estatística das frações solares

As razões entre as irradiações solares fotossinteticamente ativa global e difusa e suas respectivas irradiações solares totais, designadas como KPAR_G (fotossinteticamente ativa global e global) e KPAR_D (fotossinteticamente ativa difusa e difusa), foram investigadas com base nos dados diários dos anos de 2000 e 2001. Essas frações representam proporções do espectro da irradiação solar incidente na superfície terrestre, que é composto pelas bandas de luz solar ultravioleta, fotossinteticamente ativa e infravermelha próxima. A Tabela 7 apresenta os valores médios, desvios padrão e amplitude das frações solares (K_T, KPAR_G e KPAR_D) calculadas a partir dos dados de Botucatu, São Paulo - Brasil. Os resultados obtidos indicam que, na partição temporal diária, e considerando todas as condições de cobertura de céu, as médias dessas frações foram de 0,468 para KPAR_G e 0,440 para KPAR_D.

Tabela 7 - Estatísticas descritivas das frações solares (adimensional).

Fração Solar (Adimensional)	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo
K _T	0,554	0,162	0,059	0,769
KPAR _G	0,468	0,050	0,372	0,629
KPAR _D	0,440	0,071	0,297	0,688

As Figuras 7 e 8 mostram a relação entre as irradiações solares fotossinteticamente ativas global e difusa e as correspondentes irradiações solares totais (global e difusa) a partir de ajustes lineares pelo método dos mínimos quadrados. Nesse contexto, as equações lineares ajustadas ($\text{PAR}_G = a \text{ G}$ e $\text{PAR}_D = a \text{ D}$) permitem identificar os coeficientes angulares como representações diretas das frações KPAR_G e KPAR_D, respectivamente. Para verificar

a dependência das frações das irradiações fotossinteticamente ativas global e difusa com a cobertura de céu, os dados foram divididos em três padrões de nebulosidade em função do índice de transmissividade atmosférica (KT). A Figura 8 mostra os valores da fração KPAR_G para as coberturas de céu nublado (Figura 8a), parcialmente nublado (Figura 8b) e aberto (Figura 8c). Observa-se que a fração média foi de 0,468 em dias nublados, de 0,464 em dias parcialmente nublados e de 0,475 em dias de céu aberto, indicando uma variação relativamente pequena nas proporções entre a irradiação solar fotossinteticamente ativa global e os valores da global total ao longo dos diferentes padrões de nebulosidade.

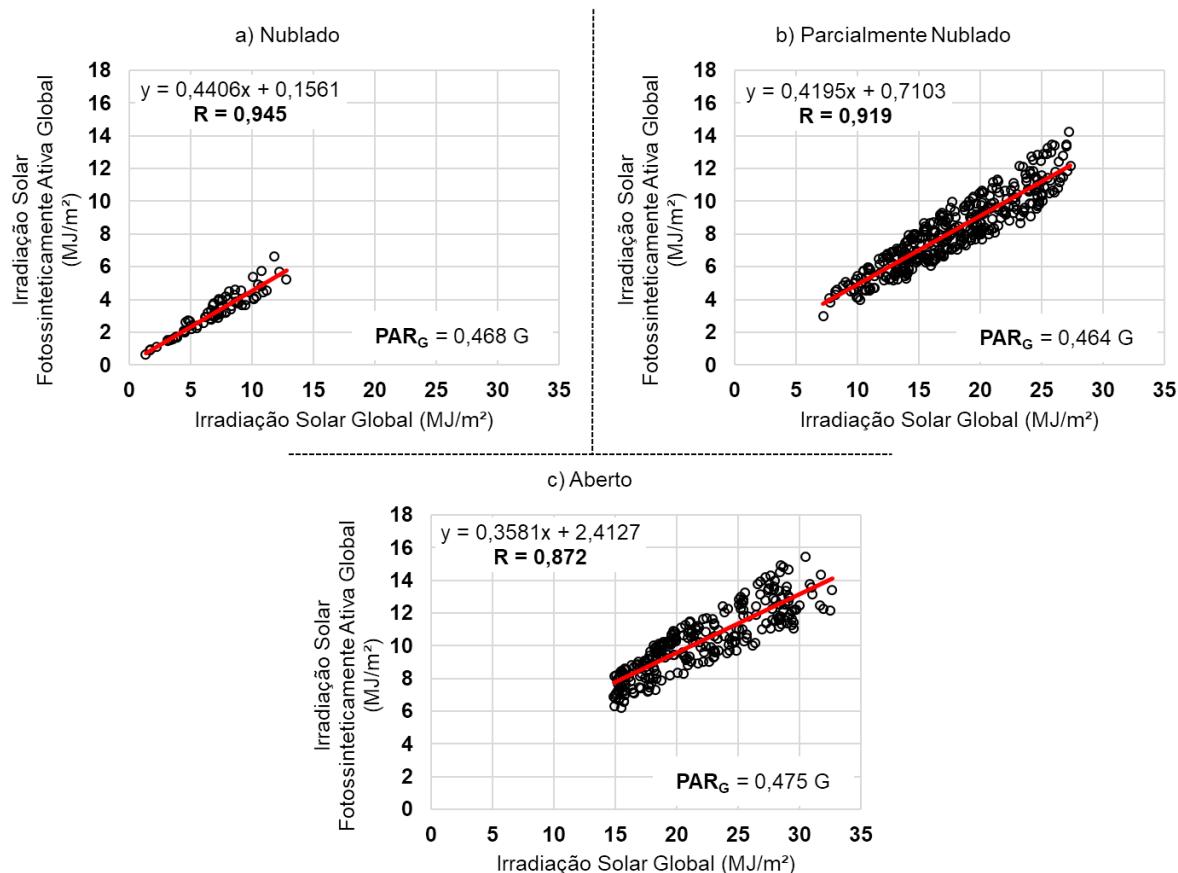


Figura 7 - Irradiações solares diárias global e fotossinteticamente ativa global por cobertura de céu (2000 e 2001).

A Figura 8 apresenta os valores da fração KPAR_D em condições de céu nublado (Figura 9a), parcialmente nublado (Figura 9b) e aberto (Figura 9c). Observa-se que a fração média foi de 0,408 em dias nublados, de 0,395 em dias parcialmente nublados e de 0,452 em dias de céu aberto. Nesse caso, nota-se uma variação mais expressiva entre as condições de cobertura de céu, especialmente em céu aberto, indicando maior variabilidade na razão entre a irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa e os valores da difusa total conforme a cobertura de céu. Os valores das frações KPAR_D em condições de céu nublado e parcialmente nublado foram próximos. No entanto, na cobertura de céu aberto o valor foi maior. Na ausência de nuvens houve um aumento da parcela da irradiação solar fotossinteticamente ativa no espectro da difusa que, neste caso, pode ter sido causado pela concentração de aerossóis na atmosfera terrestre. De acordo com Iqbal (1983), os diferentes tamanhos de aerossóis e o vapor d'água interagem de formas distintas com os diferentes comprimentos de onda do espectro da luz solar, causando perfis

diferenciados de espalhamento na irradiação solar incidente na superfície da Terra, o que pode ter contribuído para o aumento da irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa.

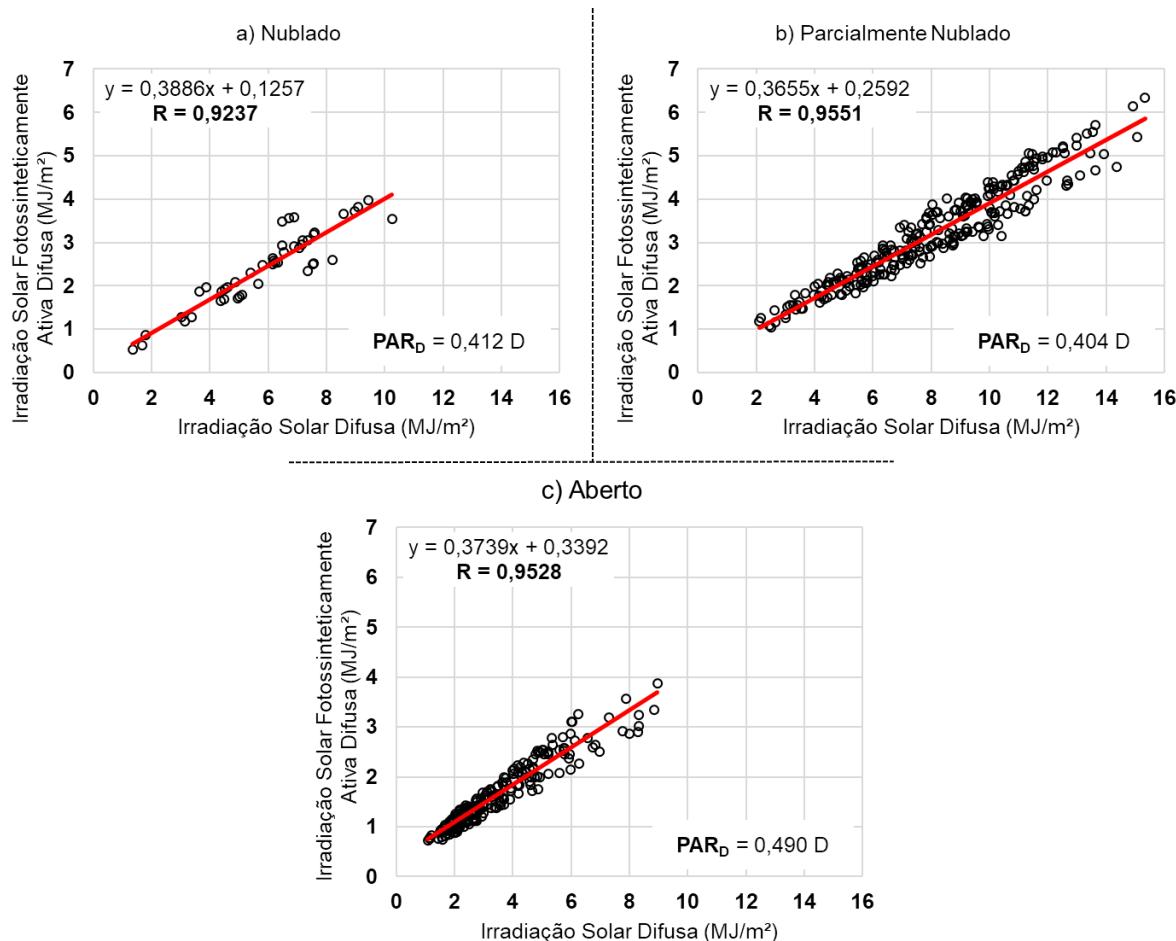


Figura 8 - Irradiações solares diárias difusa e fotossinteticamente ativa difusa por cobertura de céu (2000 e 2001).

DISCUSSÃO

A análise sazonal das frações da irradiação solar fotossinteticamente ativa global e difusa revelou padrões característicos que se correlacionam diretamente com as variações na cobertura de céu e fenômenos atmosféricos esperados, ao longo do ano. Os resultados demonstraram que a irradiação solar fotossinteticamente ativa global representa, em média, 46% da irradiação solar global total, enquanto a irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa representa aproximadamente 40% da irradiação solar difusa total. Essas frações são fundamentais para a compreensão do balanço energético em plantações vegetais e para a modelagem de processos fotossintéticos em ambientes naturais e controlados.

A fração KPAR_G, que demonstra a proporção da irradiação solar fotossinteticamente ativa global em relação à global total, apresentou estabilidade nas medidas entre as diferentes condições de cobertura de céu. Os valores médios observados foram de 0,468 para condições de céu nublado, 0,464 para parcialmente nublado e 0,475 para céu aberto, resultando em uma variação total de apenas 0,011 (1,1%). Esse comportamento confirma que a fração da fotossinteticamente ativa global permanece relativamente constante, mesmo diante de variações na nebulosidade, indicando que a composição espectral da luz solar útil para a fotossíntese é pouco afetada pela

presença de nuvens. Isso está associado ao fato de que a faixa espectral da fotossinteticamente ativa (400 - 700 nm) apresenta baixa absorção pela água presente nas nuvens, de acordo com Rossi *et al.* (2018).

Embora a variação seja pequena, observa-se uma leve tendência de aumento da fração KPAR_G em dias de céu aberto (0,475), quando comparado a condições de céu nublado (0,468). Apesar de parecer inconsistente em relação ao comportamento típico, devido à dominância da irradiação solar direta fora da faixa da fotossinteticamente ativa em dias claros, esse aumento pode estar associado à maior intensidade da irradiação solar direta dentro da própria faixa espectral fotossinteticamente ativa, ou à menor absorção dela pelo vapor d'água presente na atmosfera terrestre. Neste sentido, as frações KPAR_G mantiveram-se dentro de um intervalo estável de variação de 46% a 47,5%, o que possui relevância para estudos agrometeorológicos e modelos de produtividade vegetal. A estabilidade observada sugere que é possível estimar a irradiação solar fotossinteticamente ativa global a partir da irradiância solar global total com boa precisão, inclusive por meio de modelos empíricos simples.

Por outro lado, a fração KPAR_D, que representa a razão entre a irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa e a difusa total, demonstrou maior variabilidade conforme a cobertura de céu. Os valores médios observados foram de 0,412 em condições de céu nublado, 0,404 em céu parcialmente nublado e 0,490 em céu aberto, o que representa uma diferença de 0,086 entre os extremos (8,6 %). Essa maior sensibilidade pode indicar que a composição espectral da irradiação solar difusa é mais suscetível à influência dos constituintes atmosféricos variáveis, como vapor d'água e aerossóis, do que a irradiação solar global.

A fração KPAR_D apresentou o maior valor em dias de céu aberto (0,490), comportamento contrário ao que seria normalmente esperado. Sob condições de céu aberto, a irradiação solar difusa tende a ser menor e menos espalhada, o que normalmente indicaria uma menor proporção de irradiação solar fotossinteticamente ativa. No entanto, a maior fração observada pode estar relacionada à presença de aerossóis finos, que promovem espalhamento preferencial em comprimentos de onda curtos, como é o caso da faixa espectral fotossinteticamente ativa, além da reduzida absorção dela pelo vapor d'água, conforme explicado por Iqbal (1983). Já as frações em condições de céu nublado (0,412) e parcialmente nublado (0,404) apresentaram valores próximos, o que pode indicar que a presença de nuvens densas ou moderadas não altera consideravelmente a proporção da irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa.

Os valores de transmissividade atmosférica (KT) reforçam essa diferenciação entre as frações das irradiações solares. Neste caso, o índice de transmissividade atmosférica (KT) variou amplamente entre 0,059 e 0,769, com um desvio padrão de 0,162, refletindo a forte influência da nebulosidade e da carga atmosférica ao longo do período de estudo. Em comparação, a fração KPAR_G apresentou a menor variabilidade, com um desvio padrão de 0,050, evidenciando a robustez da razão entre a irradiação solar fotossinteticamente ativa global e a global total em diferentes condições atmosféricas. Em contrapartida, a fração KPAR_D exibiu variações mais expressivas, com um desvio padrão de 0,071, o que reforça a sua sensibilidade aos constituintes atmosféricos, especialmente em dias de céu aberto.

Além dos fatores atmosféricos, os aspectos operacionais e instrumentais também podem influenciar os resultados que foram apresentados, particularmente na medição da irradiação solar difusa. A utilização de anéis de sombreamento requer correções geométricas que considerem a parcela da irradiação solar bloqueada pela própria estrutura de montagem. De acordo com Oliveira *et al.* (2002), ajustes mais refinados e monitoramento contínuo da calibração dos instrumentos são essenciais para garantir maior precisão nas medições de irradiação solar difusa, ainda mais em dias com baixa transmissividade atmosférica.

Por fim, a influência da sazonalidade foi claramente observada na série temporal de irradiações solares. As irradiações solares global e fotossinteticamente ativa global apresentaram valores máximos durante o verão e

mínimos no inverno, acompanhando a variação da declinação solar ao longo do ano. Esse padrão é típico de regiões tropicais, onde o maior ângulo zenital solar e o prolongamento do fotoperíodo durante os meses mais quentes resultam em maior disponibilidade de energia solar na superfície terrestre (Tieghi e Dal Pai, 2022). Porém, a maior nebulosidade observada no verão, consequência de processos convectivos mais intensos, impacta diretamente a proporção entre a irradiação solar direta e difusa, modulando a distribuição espectral da energia solar incidente que atinge a superfície terrestre (Dal Pai *et al.*, 2016).

CONCLUSÃO

Este estudo permitiu caracterizar o comportamento das irradiações solares fotossinteticamente ativa global e difusa, com ênfase nas frações espectrais em relação às irradiações solares global e difusa totais, em função da cobertura de céu em Botucatu, São Paulo - Brasil. Do ponto de vista operacional, medir a irradiação solar fotossinteticamente ativa difusa revelou-se um desafio, assim como é com relação a irradiação solar difusa total, exigindo maior rigor no controle de qualidade devido às limitações e correções necessárias pelo uso do anel de sombreamento. Os resultados mostraram que as irradiações solares global e fotossinteticamente ativa global apresentaram forte correlação linear ($R = 0,946$), assim como a difusa e a fotossinteticamente ativa difusa ($R = 0,971$), o que torna possível a construção de modelos empíricos para estimar essas informações em locais onde não se tem a disponibilidade de instrumentos para obtenção direta de medidas. Os valores médios registrados durante o período de condução do experimento (2000 a 2001) foram de $18,25 \text{ MJ/m}^2$ para a global, de $6,39 \text{ MJ/m}^2$ para a difusa, de $8,47 \text{ MJ/m}^2$ para a fotossinteticamente ativa global e de $2,50 \text{ MJ/m}^2$ para a fotossinteticamente ativa difusa, com um padrão sazonal bem definido, onde as maiores medidas foram observadas no verão, e as menores no inverno, devido à variação da declinação solar e à nebulosidade.

Em termos relativos, a fração da irradiação solar fotossinteticamente ativa global em relação a global total ($KPAR_G$) apresentou uma média de 46,8% e uma variação pouco sensível dos valores em relação a cobertura de céu, indicando estabilidade espectral da faixa de luz fotossinteticamente ativa, mesmo sob diferentes condições atmosféricas. Já a fração da fotossinteticamente ativa difusa em relação a difusa total ($KPAR_D$) variou mais, com uma média de 44% e uma maior sensibilidade à cobertura de céu (nebulosidade), especialmente em dias de céu aberto, sugerindo uma influência significativa de aerossóis e vapor d'água sobre a composição espectral da irradiação solar difusa. Essas observações reforçam a importância do monitoramento contínuo da irradiação solar fotossinteticamente ativa para uso em atividades agrometeorológicas, sobretudo em regiões agrícolas com culturas de alta demanda energética. Além disso, os resultados contribuem para o aprimoramento de modelos de produtividade vegetal e simulações da eficiência do uso da luz, oferecendo subsídios técnicos para a gestão mais precisa da radiação solar disponível na superfície terrestre.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Ciências Agronômicas (UNESP) de Botucatu (SP) -Brasil.

REFERÊNCIAS

CALÇA, M. V. C.; RANIEIRO, M. R.; FERNANDO, D. M. Z.; RODRIGUES, S. A.; DAL PAI, A. Outliers detection in a quality control procedure for measurements of solar radiation. *IEEE Latin America Transactions*, v. 17, p. 1-7, 2019. DOI: 10.1109/TLA.2019.8986419.

CHENG, S. J.; BOHRER, G.; STEINER, A. L.; HOLLINGER, D. Y.; SUYKER, A.; PHILLIPS, R. P.; NADELHOFFER, K. J. Variations in the influence of diffuse light on gross primary productivity in temperate ecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 201, p. 98-110, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.002>.

DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. R.; CODATO, G. Measuring shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: correction based on sky cover. **Renewable Energy**, v. 99, p. 754-763, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.026>.

FRANCO, J. R.; DAL PAI, E.; CALÇA, M. V. C.; RANIEIRO, M. R.; DAL PAI, A.; SARNIGHAUSEN, V. C.; ROMÁN, R. M. S. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. **Irriga**, v. 28, n. 1, p. 77-92, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2023v28n1p77-92>.

GAVILÁN, P.; RUIZ, N.; LOZANO, D. Daily forecasting of reference and strawberry crop evapotranspiration in greenhouses in a Mediterranean climate based on solar radiation estimates. **Agricultural Water Management**, v. 159, p. 307-317, 2015. DOI: 10.1016/j.agwat.2015.06.012.

GOMES, J. M. R.; CARLESSO, F.; VIEIRA, L. E.; SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2017-0342>.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Toronto: Academic Press, 1983. 390 p.

JATOBÁ, L.; SILVA, A. F. **Tópicos especiais de climatologia**. 1. ed. Itacaiúnas, Ananindeua - PA, 2020. 210 p.

LEMAINSKI, L. E.; FOLLMANN, D. N.; NIEM, A. H.; ROSSATO, R. M.; FREIBERG, C. M.; BREZOLIM, E. Interception of photosynthetically active radiation, growth and yield of grains in sunflower under doses of nitrogen. **Revista Ceres**, v. 70, n. 6, 2023. DOI: 10.1590/0034-737X202370060013.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 3, n. 4, p. 1-19, 1960. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1).

OLIVEIRA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; MACHADO, A. J. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, p. 698-708, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0698:ANSRDF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0698:ANSRDF>2.0.CO;2).

ROSSI, T. J.; ESCOBEDO, J. F.; SANTOS, C. M.; ROSSI, L. R.; SILVA, M. B. P.; DAL PAI, E. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu / SP / Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 448-459, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.030>.

SANTANA NETO, V. P.; SOARES, D. M.; SILVA, T. C.; TORRES, F. T. P. Assessment of two methods on zoning wildfire propagation in Itacolomi State Park, Minas Gerais State, Brazil. **Brazilian Journal of Forestry Research**, v. 43, p. 1-12, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4336/2023.pfb.43e202102227>.

TIEGHI, C. P.; DAL PAI, A. Sazonalidade da radiação solar global em superfície vertical. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 30, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.15578>.

XIAO, L.; SHIBUYA, T.; KATO, K.; NISHIYAMA, M.; KANAYAMA, Y. Effects of light quality on plant development and fruit metabolism and their regulation by plant growth regulators in tomato. **Scientia Horticulturae**, n. 300, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111076>.