

SÉRIE ANUAL DAS IRRADIAÇÕES UV, PAR E IV EM BOTUCATU/SP/BRASIL

João Francisco Escobedo - escobedo@fca.unesp.br

Douglas Rodrigues - douglasrodrigues.dr@gmail.com

Departamento de Recursos Naturais /FCA/UNESP/Botucatu/SP/Brasil

Alexandre Dal Pai – adalpai@fatecbt.edu.br

Faculdade de Tecnologia (FATEC) - Botucatu/SP/Brasil

Amauri Pereira de Oliveira – apdolive@usp.br

Jacyra Soares – jacyra@usp.br

Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG/USP/São Paulo/SP/Brasil

Resumo. No trabalho são apresentados os valores das irradiações \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} (horária e diária); das transmissividades atmosféricas \bar{K}_t , $\bar{K}_{t_{UV}}$, $\bar{K}_{t_{PAR}}$ e $\bar{K}_{t_{IV}}$ e das razões UV/G, PAR /G e IV/G (\bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV}) médias mensais. As irradiações horárias foram maiores em março com valores de 1,7MJ/m², 0,073MJ/m², 0,85MJ/m² e 0,79MJ/m² e menores em julho com valores de 1,37MJ/m², 0,052MJ/m², 0,67MJ/m² e 0,65MJ/m² respectivamente. Similarmente, as irradiações diárias foram maiores em fevereiro com valores de 21,5MJ/m², 10,7MJ/m², 9,84MJ/m² e 0,92MJ/m² e menores em junho com valores de 13,05MJ/m², 0,504MJ/m², 6,36MJ/m² e 6,19MJ/m² respectivamente. A transmissividade atmosférica das irradiações foi menor no mês mais nebuloso e úmido (janeiro), e maior no mês com maior número de dias com céu claro (abril): \bar{K}_t , variou de 44,5% a 60,8%; $\bar{K}_{t_{UV}}$ de 34,8% a 42,3%, $\bar{K}_{t_{PAR}}$ de 57,7% a 74,8% e $\bar{K}_{t_{IV}}$ de 36,4% a 53,2%. As razões \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} foram maiores e a razão \bar{K}_{IV} menor no mês mais nebuloso e úmido (janeiro). Por outro lado as razões \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} foram menores e a razão \bar{K}_{IV} maior no mês mais seco, sem nuvens e com aerossóis (agosto): \bar{K}_{UV} variou de 4,6% a 3,9%, \bar{K}_{PAR} de 50,7% a 48,2% e \bar{K}_{IV} de 44,6% a 48,3%.

Palavras-chave: radiações solares ultravioleta, fotossinteticamente ativa e infravermelha.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre as relações entre a radiação solar Global (0,285µm a 3,0µm) e a radiações solares ultravioleta-UV (0,285µm a 0,385µm), fotossinteticamente ativa-PAR (0,385-0,7µm) e infravermelha-IV (0,7µm – 3,0µm) por meio de séries (temporal e espacial) ou por modelos de estimativas, é importante para muitas áreas científicas e tecnológicas. A literatura mostra que a grande maioria dos trabalhos vêm de estudos com modelos estatísticos, os quais são simples e precisos nas estimativas dessas radiações para locais específicos de origem dos dados. A radiação UV já foi investigada em cidades como Postam na Alemanha, Valência e Córdoba na Espanha, Cairo no Egito, Kwangju na Coreia do Sul, Athalassa no Chipre, Botucatu e Recife no Brasil, entre outros locais. A razão UV/G é altamente dependente das variações das concentrações de nuvens, vapor d'água, ar seco e aerossóis, na atmosfera do local. Os resultados mostram que a radiação UV total constitui uma fração entre 2,0 % a 9,5% da radiação solar global G (Al-Aruri et al., 1988; Robaa, 2004; Cañada et al., 2003; Martinez-Lozano et al., 1999; Jacovides et al., 2006; Ogunjobi e Kim, 2004, Tiba, 2010 e Escobedo et al., 2009 e 2011). Similarmente, a razão entre as radiações PAR e G, já foi estudado em muitos locais e com diferentes climas. Os resultados mostram que a razão PAR/G representa um percentual entre 40,8% a 63,1% como mostram os trabalhos de Jacovides et al. (2007) para Athalassa no Chipre e Atenas na Grécia, respectivamente; Finch et al. (2004) para Lusaka na Zâmbia; Blackburn e Proctor (1983) em Guelph/Ontário/Canadá; Rao (1984) para Corvallis em Oregon no Estados Unidos; de Papaioannou et al. (1996) para Atenas na Grécia; de Stigter e Musabilha (1982) em Llorim na Nigéria, e Escobedo et al. (2009 e 2011) em Botucatu no Brasil. Com as radiações IV e G existem poucas informações experimentais simultâneas na superfície terrestre. Resultados recentes mostram que a radiação IV constitui o percentual entre 46,9% a 51,0% da radiação global, como mostram os trabalhos de Escobedo et al. (2011) em Botucatu no Brasil; Zhang (2000) em Lhasa na China e Bolsenga (1997) em Thule na Groenlândia. Medidas simultâneas das radiações espectrais UV, PAR e IV, em um único local, ainda são escassas, e há poucas informações disponíveis na literatura. Com esse propósito, a Estação de Radiometria Solar monitorou as radiações G, UV e IV no período de 2001 a 2005 em Botucatu/SP/Brasil, e neste trabalho é apresentada uma análise estatística e climática dessas medidas. Foram calculadas ainda as transmissividades atmosféricas das radiações espectrais, bem como as frações UV, PAR e IV da radiação G médias mensais.

2. MATERIAS E METODOS

2.1 Clima e instrumentação

O experimento foi realizado no período de janeiro de 2001 a dezembro de 2005 na Estação de Radiometria Solar de Botucatu-SP, UNESP (latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m). O clima local é temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido, e o inverno é frio e seco. A Fig. 1(a, b, c,) mostra as séries climáticas da temperatura, umidade relativa, nebulosidade e precipitação, do período de 1970 a 2000 em Botucatu. A evolução anual da temperatura e umidade relativa média mensal segue a variação astronômica da declinação solar: os valores da temperatura e umidade relativa são maiores quando o sol declina mais próximo da latitude local nos meses de outubro a março, e menor quando declina mais distante da latitude local nos meses de abril a setembro. Os meses de fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2C⁰ e 17,1C⁰. Os meses de fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmido, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

A nebulosidade (Fig. 1b) segue na grande maioria dos meses, as variações climáticas da temperatura e umidade relativa: é maior nos meses de janeiro (61,0%) e menor no mês de agosto (27,0%). A exceção ocorre nos meses de maio e junho, nos quais a temperatura e umidade relativa decrescem, e a nebulosidade aumenta em relação a abril. Essa singularidade existe devido às entradas das frentes frias vindas do sul e sudeste do país, que arrastam grandes quantidades de massas de ar frio, para a região nordeste no outono, nos meses de abril e maio. O ciclo da precipitação (Fig. 1c) é constituído de períodos bem distintos, de acordo com o regime de chuvas: período chuvoso (outubro à março) e o período seco (abril à setembro), onde os índices pluviométricos encontram-se abaixo do nível de 100mm. No período chuvoso, a precipitação é de natureza microclimática originada do processo de convecção livre e macroclimáticas originadas dos eventos meteorológicos como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Atlântico Sul. É do tipo localizada e com grande variabilidade espacial.

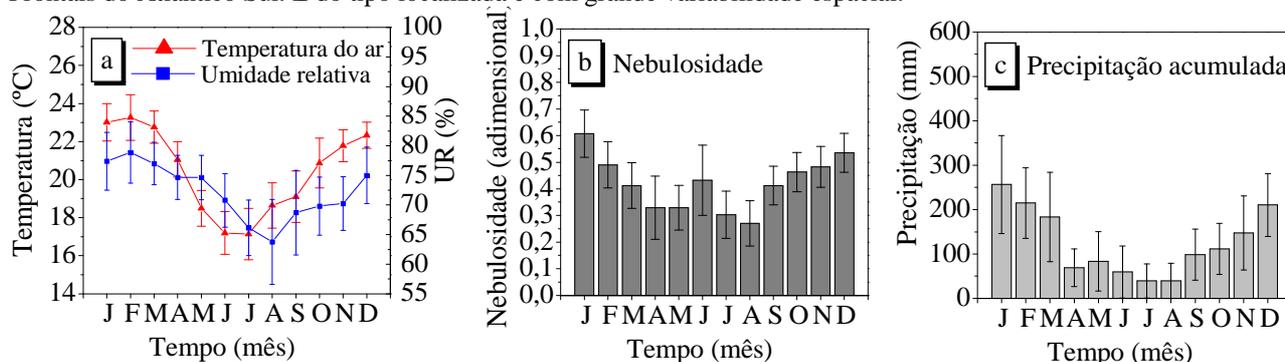


Figura 1 - Séries climáticas da temperatura e umidade relativa (a), nebulosidade (b), precipitação (c) do período de 1970 a 2000 em Botucatu.

No período seco, de abril a setembro (outono e inverno), a precipitação é do tipo frontal originada do encontro das massas frias e secas vindas da região sul com as massas quentes e úmidas, da região sudeste. A distribuição da chuva frontal é generalizada na região; a intensidade é de fraca a moderada, dependendo do tipo de frente fria; e a duração é de média a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm.

A irradiância global (I_G) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSP, a irradiância ultravioleta (I_{UV}) por um radiômetro CUV-3 da Kipp-Zonen e a irradiância infravermelha (I_{IV}) por um piranômetro Eppley PSP com cúpula seletiva de transmissão na faixa espectral de 0,7 a 3,0 μ m. Por sugestão do fabricante, o fator de calibração do piranômetro IV é multiplicado por um fator de 0,92 para corrigir o efeito da transmissão da cúpula no elemento sensível do sensor. A irradiância PAR (I_{PAR}) utilizada neste trabalho foi gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância I_G e a soma das irradiâncias I_{UV} e I_{IV} medidas na mesma frequência, por meio da equação: $I_{PAR} = I_G - (I_{UV} + I_{IV})$. Em muitos trabalhos na literatura a irradiância PAR é expressa em termos da densidade de fluxo de fótons (μ E m⁻² ou μ mol m⁻²s) absorvido entre 0,400 e 0,700 μ m. Aqui a PAR será expressa em Wm⁻² para irradiância e MJm⁻² para irradiações horárias e diárias. O erro da estimativa da radiação PAR está associado à imprecisão das medidas da radiação global e infravermelha pelos piranômetros da Eppley e da medida da radiação UV pelo do radiômetro UV da Kipp & Zonen: o piranômetro PSP possui uma incerteza da ordem de 1,5% a 2,0%, enquanto que, o radiômetro UV da Kipp & Zonen de 5,0% (Huang et al., 2011). Assim a radiação PAR que foi obtida por diferença por meio da equação: $I_{PAR} = I_G - (I_{UV} + I_{IV})$ possui uma incerteza estimada de 9,0%. A estação de Radiometria Solar de Botucatu dispõe de radiômetros solares adicionais, os quais são utilizados unicamente para aferição dos equipamentos de rotina. As aferições são realizadas a cada 2 anos pelo método comparativo sugerido pela OMM (1986). Na aquisição dos dados foi utilizado um Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1Hz e armazenando médias de 300 leituras ou 5 minutos. Inicialmente, os dados passam por um controle de qualidade, eliminando-se os valores espúrios, que causariam ausência de correlação e numa segunda etapa, os dados são processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das irradiações horárias e diárias.

2.2 Cálculo das irradiações, transmissividade atmosférica e razões médias mensais (horárias e diárias)

As irradiações médias G, UV, PAR e IV no período de 2001 a 2005 foram calculadas para dois processos estatísticos: total e inter-anos. Na estatística total, os valores das irradiações médias (horárias e diárias) com os respectivos desvios padrões foram calculadas para cada intervalo mensal em MJ/m², pela Equação 1, com a base de dados totais, onde all representa o número de medições da irradiação (horária e diária) dos 5 anos.

$$\bar{H}_X = (\sum_{i=1}^{all} H_{X_i})/all \quad (\text{Eq. 1})$$

Na estatística Inter-Anos, os valores das irradiações médias mensais (horárias e diárias) com os respectivos desvios padrões foram calculadas para cada intervalo mensal em MJ/m² pela Equação 2, com os valores das irradiações médios mensais de cada ano, onde n é o número de radiação horária em cada intervalo horário de cada ano, e m é o número de anos (5anos).

$$\langle \bar{H}_X \rangle = [\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n H_{X_i}/n)]/m \quad (\text{Eq. 2})$$

O índice X representa as irradiações G, UV, PAR e IV respectivamente.

A transmissividade atmosférica média mensal (horária e diária) $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ das irradiações G, UV, PAR e IV no período de 2001 a 2005 foram calculadas com os respectivos desvios padrões em cada intervalo mensal em MJ/m², pela Equação 3, com os dados totais onde all é o número da irradiação horária e diária dos 5 anos.

$$\bar{K}t_X = (\sum_{i=1}^{all} H_{X_i}/H_{OX_i})/all \quad (\text{Eq. 3})$$

O índice X representa as irradiações G, UV, PAR e IV respectivamente, e OX as irradiações extraterrestres G, UV, PAR e IV.

As razões médias mensais (horárias e diárias) $\bar{K}_{UV} = UV/G$, $\bar{K}_{PAR} = PAR/G$ e $\bar{K}_{IV} = IV/G$ no período de 2001 a 2005 foram calculadas para os processos estatísticos, total e inter-anos. Na estatística total, os valores das razões médias mensais \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} com os respectivos desvios padrões foram calculadas para cada intervalo mensal em MJ/m², pela Equação 4, com os dados totais, onde all é o número da irradiação (horária e diária) dos 5 anos.

$$\bar{K}_Y = (\sum_{i=1}^{all} H_{Y_i}/H_{G_i})/all \quad (\text{Eq. 4})$$

Na estatística Inter-Anos, os valores das irradiações médias mensais (horárias e diárias) com os respectivos desvios padrões foram calculadas para cada intervalo horário em MJ/m² pela Equação 5, com os valores das razões médias mensais de cada ano, onde n é o número de radiação horária em cada intervalo mensal de cada ano, e m é o número de anos (5anos).

$$\langle \bar{K}_Y \rangle = [\sum_{j=1}^m (\sum_{i=1}^n (H_{Y_i}/H_{G_i}))]/m \quad (\text{Eq. 5})$$

O índice Y representa as irradiações UV, PAR e IV respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Série anual da irradiação média mensal (horária e diária): total e inter-anos

Os valores de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} anual e de $\langle \bar{H}_G \rangle$, $\langle \bar{H}_{UV} \rangle$, $\langle \bar{H}_{PAR} \rangle$ e $\langle \bar{H}_{IV} \rangle$ inter-anos (horária e diária) calculadas por dois métodos estatísticas, anual e inter-anos, de acordo com as Equações 1 e 2 em cada intervalo mensal são aproximadamente iguais, e quando submetidos ao teste t, o resultado mostrou que no intervalo de confiança de 99,0%, os valores das irradiações médias mensais total, não apresentaram diferença significativa estatisticamente em relação às irradiações médias mensais inter-anos. Assim para representar graficamente as irradiações médias mensais usaremos a obtida pela estatística total, como mostrado na Fig. 2. As variações sazonais de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} , horária e diária, são resultantes das variações astronômicas e climáticas. A evolução anual de \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} acompanhou a da \bar{H}_G com maiores valores na sequência para as radiações PAR, IV e UV em todos os meses do ano. Uma única exceção, ocorreu no mês de agosto, mês mais seco do ano onde a irradiação IV horária e diária foram superiores as irradiações da PAR. Os valores de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} , são maiores quando o sol declinou mais próximo da latitude local (declinação solar negativa) nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro. Nestes meses do período chuvoso, as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, são maiores no ano (Fig. 1). Ao contrário, os valores das irradiações foram menores nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro quando o sol declinou mais distante da latitude local. Nesses meses do período seco, as concentrações de nuvens e vapor de água são as menores, e a concentração de aerossóis é maior no ano (Fig. 3). A variabilidade de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} do período chuvoso, está fortemente associada às variações da nebulosidade, precipitação e vapor d'água na atmosfera originadas pelas variações

microclimáticos descrito na secção (2) e pelos fenômenos sinóticos macro-climáticos denominado Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Oceano Atlântico. O ZCAS gera aumento da nebulosidade com ocorrência de chuvas intensas e persistentes. A frequência desse evento é de duas a quatro vezes ao ano, com duração média de até 8 dias nos meses janeiro, fevereiro e março (Liebmann et al., 2001; Carvalho et al., 2002).

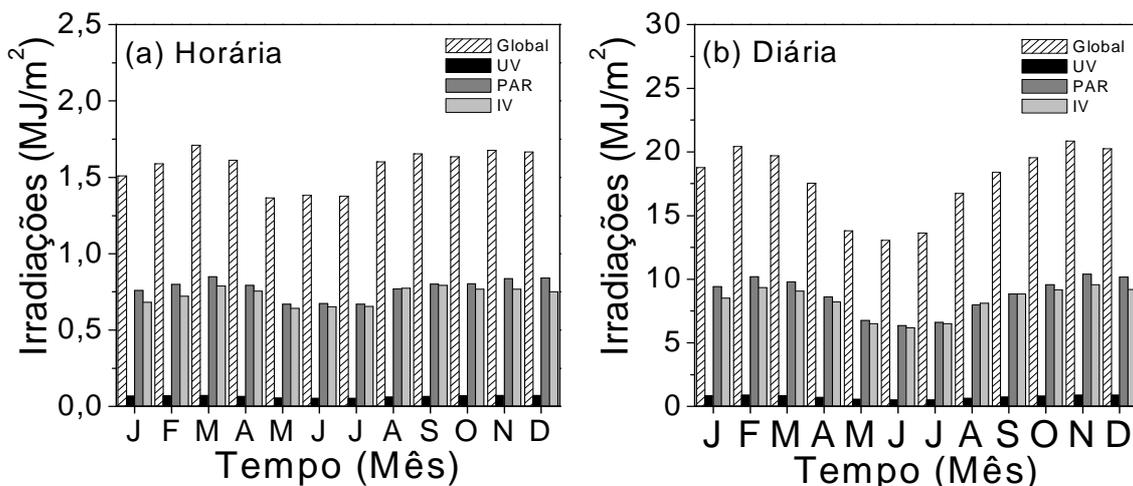


Figura 2 - Evolução anual das irradiações médias mensais, horária e diária \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} total.

O Sistema Frontal do Oceano Atlântico é entrada de frentes úmidas originadas no oceano atlântico que geram aumento na nebulosidade e ocorrência de chuvas de média e alta intensidade nos meses de outubro, novembro e dezembro.

No período seco, os valores de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} também são afetados pelas variações da nebulosidade, precipitação e vapor d'água na atmosfera, porém são originada pelo fenômeno sinótico macro-climático denominado Sistema Frontal Polar, e por aerossóis originados nas queimadas da cana-de-açúcar. O Sistema Frontal Polar é resultante de passagem de frentes frias vindas da região polar que geram aumento na nebulosidade e ocorrência de chuvas de média e baixa intensidade nos meses de maio e junho. A frequência das frentes frias média de 5 eventos por mês no Estado de São Paulo (Satyamurty & Mattos, 1989).

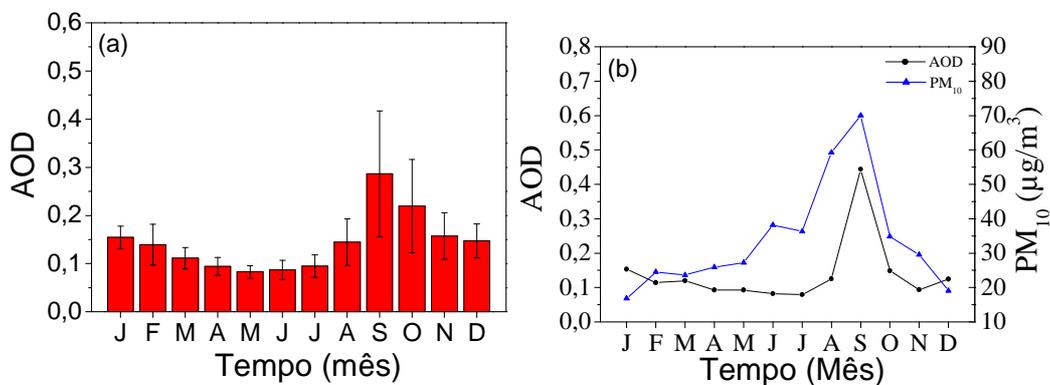


Figura 3 - a) Relação entre a evolução anual da profundidade ótica de aerossóis AOD médias mensais (obtidas do satélite TERRA) no ano de 2001 a 2005. b) Relação entre e a concentração de materiais particulados PM_{10} em $\mu g.m^{-3}$.

Os aerossóis são originados anualmente nas queimadas da cana-de-açúcar nos meses entre julho a novembro. Na Fig. 3(a) está representada a evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA e mostra que o material particulado máximo ocorre em setembro. Na Fig. 3(b), os resultados da calibração entre dados de satélite e as medidas para o ano de 2004 mostram que o valor máximo de AOD = 0.45 em setembro é equivalente a concentração PM_{10} de $70.0 \mu g m^{-3}$ (Codato et al., 2008).

O desvio padrão total (Fig. 4a, b) mostra a amplitude de variação de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} , em cada mês do ano, enquanto que o desvio padrão inter-anos (Fig. 4c, d) mostram a amplitude de variação de $\langle \bar{H}_G \rangle$, $\langle \bar{H}_{UV} \rangle$, $\langle \bar{H}_{PAR} \rangle$ e $\langle \bar{H}_{IV} \rangle$ em cada mês do ano, entre os anos. O desvio padrão das irradiações médias mensais (Fig. 4a, c) é maior que o desvio padrão das irradiações médias mensais diárias (Fig. 4a, c). Esse resultado já era esperado, pois as partições de tempo menores respondem com mais sensibilidade e rapidez às mudanças da atmosfera, permitindo melhor detalhamento da distribuição pontual das radiações, e consequentemente, produzindo uma maior variabilidade. Na partição de tempo maior, os efeitos da dinâmica da atmosfera são suavizados por meio da integração dos valores instantâneos, diminuindo a variabilidade dos valores das irradiações. O desvio padrão de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} , total é maior que o desvio padrão $\langle \bar{H}_G \rangle$, $\langle \bar{H}_{UV} \rangle$, $\langle \bar{H}_{PAR} \rangle$ e $\langle \bar{H}_{IV} \rangle$ inter-anos porque na estatística total, as variações das irradiações ($n = \text{dados}$) dependem das variações astronômicas (ângulo horário e declinação solar) e climáticas, enquanto

que na estatística entre os anos, as variações dos valores médios das irradiações ($n = 5$) dependem das variações climáticas de cada ano. O desvio padrão total das quatro irradiações horárias (Fig. 4a) variou aproximadamente de 60,0% a 80,0% e as irradiações diárias (Fig. 4b) de 23,0% a 40,0%. O desvio padrão foi maior no período chuvoso nos meses de janeiro, fevereiro a março, outubro, novembro e dezembro, nos quais são maiores as variações das concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera na atmosfera.

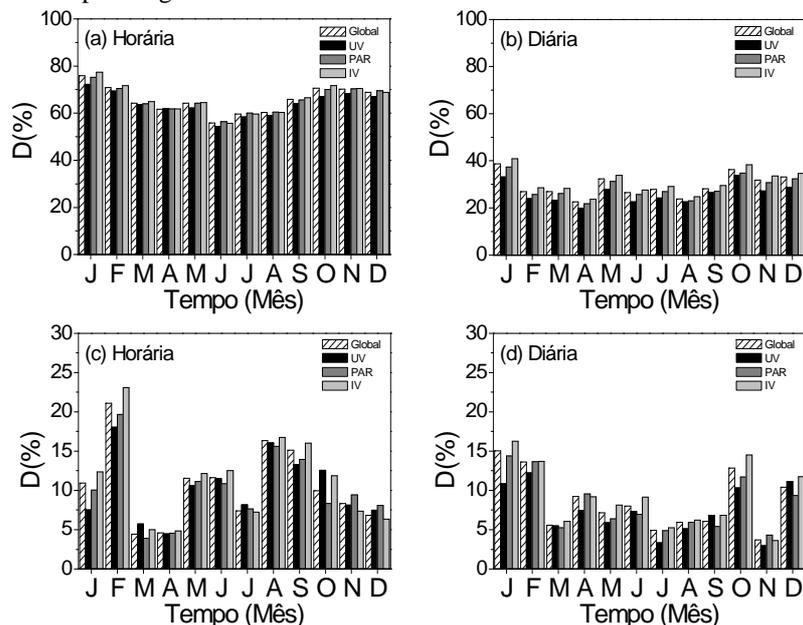


Figura 4 - Evolução anual dos desvios padrões das irradiações médias mensais, total (4a, b) e inter-anos (4c, d).

Ao contrário, o valor do desvio padrão foi menor, no período seco nos meses de abril, junho, julho, agosto e setembro, nos quais as variações das concentrações da nebulosidade e vapor d'água são as menores e a concentração de aerossóis é maior, no ano. A exceção ocorreu em maio, onde o aumento do desvio padrão deu-se a uma variação atípica da nebulosidade ocorrida entre os anos de 2003 com valor de 0,21 e em 2004 com 0,47.

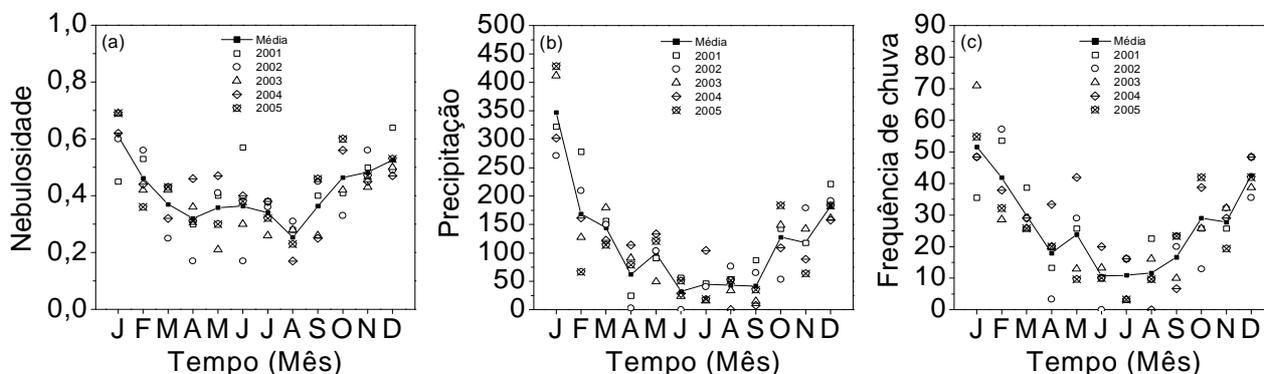


Figura 5 - Valores médios mensais diários da nebulosidade, precipitação acumulada média mensal e frequência de chuvas nos anos 2001 a 2005.

O desvio padrão inter-anos (Fig. 4c, d) variou aproximadamente, entre 3,5% a 24,0% para as irradiações médias mensais horárias, e entre 3,0% a 16,0% para as irradiações médias mensais diárias. A Fig. 5 mostra que os fatores climáticos responsáveis pela variabilidade das irradiações nos anos foi a variabilidade nebulosidade, vapor de água e tipo de precipitação, em cada ano, em função da entrada do ZCAS nos meses de janeiro e fevereiro; entrada de frentes frias nos meses de abril, maio e junho, juntamente com as queimadas da cana-de-açúcar em agosto e setembro, e entrada de frentes úmidas do Oceano Atlântico em outubro.

3.2 Transmissividade atmosférica das irradiações G , UV , PAR e IV média mensal: $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$

As evoluções de \bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} e \bar{H}_{IV} (horária e diária) mostrados na Fig. 2, quando normalizadas por suas respectivas radiações no topo da atmosfera, definem a transmissividade atmosférica de cada radiação, e eliminam a dependência do dia e local das medidas. Assim a sazonalidade mostrada na Fig. 6 da transmissividade média mensal das irradiações \bar{H}_G ($\bar{K}t$), \bar{H}_{UV} ($\bar{K}t_{UV}$), \bar{H}_{PAR} ($\bar{K}t_{PAR}$) e \bar{H}_{IV} ($\bar{K}t_{IV}$) calculadas pela Equação 3 ao longo do ano é função apenas da variação climática local. Os valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ são os indicadores gerais dos processos de absorção e espalhamento por ozônio, nuvens, ar seco, vapor de água e aerossóis, que intervêm na transmissão das radiações G , UV ,

PAR e IV na atmosfera. A Fig. 6a mostra a evolução do valor de $\bar{K}t$ horário é maior que os valor diário em cada intervalo mensal. No entanto, o teste t mostra que no intervalo de confiança de 99,0%, os valores de $\bar{K}t$ horários, não apresentaram diferença significativa estatisticamente em relação aos $\bar{K}t$ diários. Assim a análise dos valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ com valores de clima (Fig. 5) será realizada apenas com os valores diários.

A Fig. 6b mostra que os valores de $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ acompanharam em todos intervalos mensais o valor de $\bar{K}t$ (Fig. 6a), sendo maior na sequência decrescente das radiações PAR, G, IV e UV. O valor percentual de $\bar{K}t_{PAR}$ variou de 57,7% a 74,8% com média total de 68,1%; $\bar{K}t$ de 44,5% a 60,8% com média total de 53,9%; $\bar{K}t_{IV}$ de 36,4% a 53,2% com média total de 45,4% e $\bar{K}t_{UV}$ de 34,8% a 42,3% com média total de 36,6%. Os valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ são menores no período chuvoso nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, nos quais as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, são maiores no ano. O mês de janeiro, o mais úmido e nebuloso possui o menor valor para $\bar{K}t = 44,5\%$; $\bar{K}t_{UV} = 34,8\%$; $\bar{K}t_{PAR} = 57,7\%$ e $\bar{K}t_{IV} = 36,4\%$. Por outro lado, os valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ é maior no período seco, nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, nos quais as concentrações de nuvens e vapor de água são as menores, e a concentração de aerossóis, é maior no ano. O mês de agosto, o mais seco, menos nebuloso e com aerossóis, possui o maior valor para $\bar{K}t = 60,9\%$ e $\bar{K}t_{IV} = 53,1\%$, enquanto que o mês de abril, o mês com maior número de dias de céu aberto possui a maior valor para $\bar{K}t_{UV} = 42,2\%$ e $\bar{K}t_{PAR} = 75,4\%$.

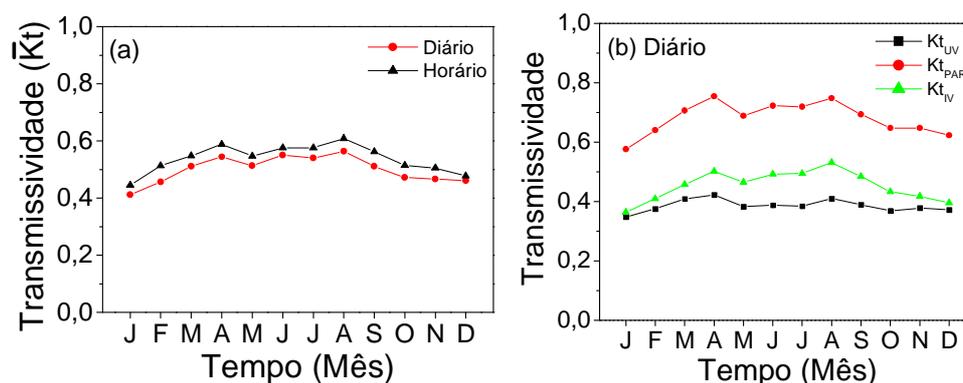


Figura 6 - a) Transmissividade atmosférica da irradiação total global, horária e diária ($\bar{K}t$); b) transmissividade atmosférica das irradiações espectrais $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$

A sazonalidade da transmissividade atmosférica $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ mostrada da Fig. 6 está fortemente associada a nebulosidade e ao vapor de água na atmosfera (Fig. 5) de cada mês. No período chuvoso, nos meses de janeiro a abril, o valor de $\bar{K}t$ aumentou de 44,5% a 59,6%, $\bar{K}t_{UV}$ de 34,8% a 42,2%; $\bar{K}t_{PAR}$ de 57,7% a 75,5% e $\bar{K}t_{IV}$ de 36,4% a 50,2% em função dos decréscimos da nebulosidade de 0,60 a 0,32 e da precipitação de 322,2mm (52,0% dos dias com chuva) a 62,2mm (18,05% dos dias com chuva). O ZCAS incidu muito fortemente no mês de janeiro nos anos de 2003 e 2005 onde a nebulosidade atingiu valor de 0,69 com frequência de 70% e 55,0% com dias chuvosos e precipitação de 412mm e 428,4mm, respectivamente. Ainda no período chuvoso, nos meses de outubro, novembro e dezembro, o valor de $\bar{K}t$ decresceu de 51,3% a 48,5%, $\bar{K}t_{UV}$ de 36,9% a 37,0%, $\bar{K}t_{PAR}$ de 64,8% a 62,3% e $\bar{K}t_{IV}$ de 43,3% a 39,6% em função do aumento de nebulosidade de 0,42 a 0,52 e da precipitação de 127mm com 29% dos dias com chuva para 183mm com 42,6% dos dias com chuva, originadas dos sistemas frontais vindas do oceano atlântico e início do ZCAS. No início do período seco, o mês de abril possui o maior valor de $\bar{K}t_{UV} = 42,2\%$ e $\bar{K}t_{PAR} = 75,5\%$ e o segundo maior valor de $\bar{K}t = 58,9\%$ e $\bar{K}t_{IV} = 50,2\%$. A elevada transmissividade das quatro radiações é atribuída a uma fase de transição entre os períodos chuvoso e o seco, no qual há uma redução acentuada da nebulosidade e da precipitação, aumentando o número de céu claro ($Kt > 0,65$) para 44,5%. Em abril o ZCAS desloca-se gradativamente para a região norte do país, permitindo o início das entradas das frentes frias vindas da região polar sul, que na maioria das vezes diminuem as concentrações de nuvens e vapor d'água da atmosfera. Em maio, a entrada das frentes frias diminuiu a frequência de dias abertos para 37,3% e os valores decresceram em relação ao valor no mês de abril para $\bar{K}t = 54,7\%$; $\bar{K}t_{UV} = 38,3\%$; $\bar{K}t_{PAR} = 68,8\%$ e $\bar{K}t_{IV} = 46,5\%$. De maio a agosto, período seco e baixa nebulosidade, o valor de $\bar{K}t$ aumentou de 54,7% a 60,9%, $\bar{K}t_{UV}$ de 38,3% a 41,0%; $\bar{K}t_{PAR}$ de 68,8% a 74,8% e $\bar{K}t_{IV}$ de 46,5% a 53,2% em função do aumento crescente do número de dias de céu aberto atingindo os valores de : 37,3%, 43,0%, 45,0% e 54,0% respectivamente em agosto. Nos meses de agosto e setembro, período seco e das queimadas, e nos meses outubro, novembro e dezembro, período úmido, os valores de $\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ decresceram em função do aumento da nebulosidade, vapor d'água e aerossóis na atmosfera: o valor de $\bar{K}t$ diminuiu de 60,9% a 48,5%, $\bar{K}t_{UV}$ de 41,0% a 37,2%; $\bar{K}t_{PAR}$ de 74,8% a 62,3% e $\bar{K}t_{IV}$ de 53,2% a 39,6%. Na análise da transmissividade atmosférica das irradiações espectrais com todos os tipos de a cobertura de céu juntas, não é possível especificar o efeito individual da nebulosidade, ar seco, vapor d'água e aerossóis no processo de extinção das radiações G, UV, PAR e IV na atmosfera.

3.3 Razões médias mensais (horária e diária) $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$

Os valores $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ e $\bar{K}t_{IV}$ (horária e diária) total e os valores $\langle \bar{K}t_{UV} \rangle$, $\langle \bar{K}t_{PAR} \rangle$ e $\langle \bar{K}t_{IV} \rangle$ intra-anual são aproximadamente iguais, e o teste t, mostrou que no intervalo de confiança de 99,0%, os valores das razões médias

mensais calculadas pelos dois métodos, não apresentam diferença estatística significativa. Assim na Fig. 7 está representada os valores das razões \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} (horária e diária) obtidos na estatística total.

Os valores \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} horários (Fig. 7a) são iguais aos valores diários (Fig. 7b) estatisticamente no intervalo de confiança de 99,0% de acordo com o teste t. Assim a discussão sobre as variações dos valores \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} em função da variação do clima será analisada com os valores diários. As variações dos valores \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} ao longo do ano (Fig. 7b), como mencionado anteriormente, estão associadas à sazonalidade da nebulosidade e vapor d'água na atmosfera causada por fenômenos meteorológicos de micro e macroescala no período úmido, e por variações de concentrações do ar seco e aerossóis originados das queimadas da cana-de-açúcar, no período seco. Os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} decresceram quase que linearmente do maior valor percentual 4,6% e 50,7% no mês mais nebuloso e úmido (janeiro) ao menor valor 3,9% e 48,2% no mês mais seco, sem nuvens e com aerossóis (agosto) respectivamente. Do mês de agosto a dezembro, os valores \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} cresceram de 3,9% e 48,2% para os valores de 4,5% e 50,5% em função do crescimento da concentração de nuvens e vapor d'água na atmosfera. Contrário à evolução das \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} , o valor de \bar{K}_{IV} aumentou quase que linearmente do menor valor 44,6% no mês mais nebuloso e úmido (janeiro) ao maior valor 48,3% no mês mais seco, sem nuvens, e com aerossóis (agosto). A seguir a razão \bar{K}_{IV} decresceu de 48,3% até o valor de 45,0% no mês com elevada concentração de nuvens e vapor d'água (dezembro).

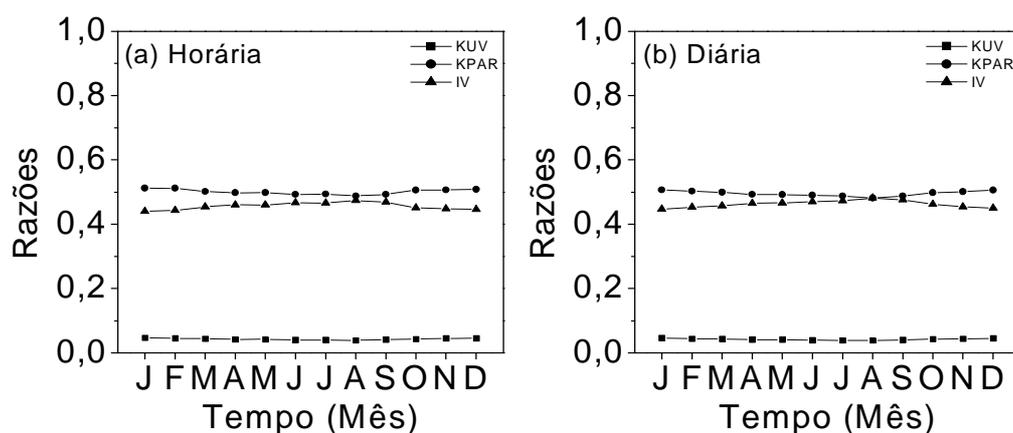


Figura 7 - Evolução anual das razões médias mensais \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} total: a) horária e b) diária.

Os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} são maiores e valor de \bar{K}_{IV} é menor na atmosfera nebulosa e úmida, devido a alta absorção da radiação IV pelo vapor de água. Neste processo, os valores \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} aumentam na atmosfera em função da absorção não proporcional entre a radiação global G e as radiações UV e PAR pelo vapor de água. A radiação G é absorvida mais rapidamente que as radiações UV e PAR. Os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} são menores e o valor de \bar{K}_{IV} é maior na atmosfera seca, sem nuvens e com aerossóis, devido à absorção e espalhamento das radiações UV e PAR pelo ar seco e aerossóis. Neste processo, os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} diminuem em função da absorção e espalhamento não proporcional entre as radiações UV e PAR, e a radiação G, por ar seco e aerossóis. As radiações UV e PAR são absorvidas e espalhadas mais rapidamente que a radiação G. A razão \bar{K}_{IV} aumenta devido à absorção e espalhamento por ar seco e aerossóis não proporcional das radiações UV e PAR que reduzem mais a radiação G que a radiação IV.

4. CONCLUSÕES

Os valores das irradiações médias mensais G, UV, PAR e IV obtidas a partir das medidas no período de 2001 a 2005 em Botucatu/SP/Brasil, dependem das variações astronômicas e climáticas: são maiores nos meses do período chuvosos janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, nos quais o sol declinou mais próximo da latitude local e as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera são as maiores no ano. Em contraste, são menores nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, os quais o sol declinou mais distante da latitude local, e as concentrações de nuvens e vapor de água são mais baixas menores, e a concentração de aerossóis é maior no ano. Os valores da transmissividade atmosférica \bar{K}_t , $\bar{K}_{t_{UV}}$, $\bar{K}_{t_{PAR}}$ e $\bar{K}_{t_{IV}}$ são menores no período chuvoso nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, nos quais as concentrações de nuvens e vapor de água na atmosfera, são as maiores no ano. Por outro lado, são maiores no período seco, nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, nos quais as concentrações de nuvens e vapor de água são os menores, e a concentração de aerossóis, são as maiores no ano. As variações dos valores de \bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} e \bar{K}_{IV} ao longo do ano, dependem da sazonalidade da nebulosidade e vapor d'água na atmosfera e por variações de concentrações do ar seco e aerossóis originados das queimadas da cana-de-açúcar, no período seco. Os valores de \bar{K}_{UV} e \bar{K}_{PAR} decresceram do mês mais nebuloso e úmido (janeiro) ao mês mais seco, sem nuvens e com aerossóis (agosto) respectivamente. Por outro lado, o valor de \bar{K}_{IV} cresceu do mês mais nebuloso e úmido (janeiro) ao maior valor no mês mais seco, sem nuvens, e com aerossóis (agosto).

Agradecimentos à FAPESP, CNPQ

REFERENCIAS

- Al-Aruri S, Rasas M, Al-Jamal K, Shaban N. An assessment of global UV solar radiation in the range (0.290-0.385 μm) in Kuwait. *Solar Energy* 1988;41:159-62.
- Blackburn WJ, Proctor JTA. Estimating photosynthetically active radiation from measured solar irradiance. *Solar Energy* 1983;31:233-34.
- Bolsenga SJ, Near Infrared Radiation in Northern Greenland. *Journal Applied Meteorology*, 1997, 6, 449-451.
- Cañada J, Pedros G, Bosca JV. Relationships between UV (0.290-0.385 μm) and broad band solar radiation hourly values in Valencia and Córdoba, Spain. *Energy* 2003; 28:199-217.
- Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B.. Extreme precipitation events in sputheastern South America and large-scale convective patters in the South Atlantic Convergence Zone. *Jornal of Climate*, v. 15, p. 2377-2394, 2002.
- Codato G, Oliveira AP, Soares J, Escobedo JF, Gomes E N, Pai AD. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 2008 (in press).
- Escobedo, João F.; Gomes, E. N.; Oliveira, A. P.; Soares, J. R. Ratios of UV, PAR and NIR components to global solar radiation measured at Botucatu site in Brazil. *Renewable Energy*, v. 36, p. 169-178, 2011.
- Escobedo, J, Gomes, E, Oliveira, A, Soares, J., 2009. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. *Applied Energy*. , v.86, p.299 – 309.
- Finch DA, Bailey WG, Mearthur LJB, Nasitwitwi M. Photosynthetically active radiation regimes in a southern African savanna environment. *Agricultural and Forest Meteorology* 2004;122:229-38.
- Fröhlich C, London J. Revised Instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publications series No. 7. WMO/TD No. 149, October 1986.
- Huang, M., Jiang, H.; JU, W. Ultraviolet Radiation over Two Lakes in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River, China: An Innovative Model for UV Estimation. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, v. 22, n. 5, p. 491-506, 2011.
- Jacovides CP, Tymvios FS, Assimakopoulos VD. The dependence of global and diffuse PAR radiation components on sky conditions at Athens, Greece. *Agricultural and Forest Meteorology* 2007;143:277-87.
- Jacovides CP, Assimakopoulos VD, Tymvios FS, Asimakopoulos DN. Solar global UV (280-380nm) radiation and its relationship with solar global radiation measured on the island of Cyprus. *Energy* 2006;31:2728-38.
- Liebmann, B.; Jones, C.; Carvalho, L. M. V. Interannual variability of daily extreme precipitation events in the state of São Paulo, Brazil. *J. Climate*, 14, p. 208–218, 2001.
- Martinez-Lozano JA, Tena F, Utrillas MP. Ratio of UV to global broad band irradiation in Valencia, Spain. *International Journal of Climatology* 1999;19:903–11.
- Ogunjobi KO. Ultraviolet (0.280-0.400 μm) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. *Atmospheric Research* 2004;71:193-214.
- Papaioannou G, Nikolidakis G, Asimakopoulos D, Retalis D. Photosynthetically active radiation in Athens. *Agricultural and Forest Meteorology* 1996;81:287–298.
- Rao CRN. Photosynthetically active components of global solar radiation: measurements and model computations. *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology* 1984;34:353-64.
- Robaa SM. A study of ultraviolet solar radiation at Cairo urban area, Egypt. *Solar Energy* 2004;77:251-59.
- Satyamurti, P e L.F. Mattos, 1989. Climatological lower trophospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. *Mon. Wea. Rev.*, 108:410-520.
- Stigter, C.J.; Musabilha, M. M. The conservative ratio of photosynthetically active to total radiation in the tropics. *Journal of Applied Ecology* 1982;19:853-58.
- Tiba, C.; Leal, N. M.; Piacentini, R. Estudo da radiação solar ultravioleta em Pernambuco. In: III Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2010, BELÉM. III Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2010. v. 3.
- Willmott CJ. On the validation of models. *Physic Geogr* 1982;2:184-94.
- Zhang X, Zhang Y, Zhou Y. Masuring and modelling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April-October. *Agricultural Meteorology* 2000;102:207-12.

ANNUAL SERIES OF UV, PAR AND IV IRRADIATIONS IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

Abstract. This work describes hourly and daily values of solar radiation components (\bar{H}_G , \bar{H}_{UV} , \bar{H}_{PAR} and \bar{H}_{IR}), broadband atmospheric transmissivity ($\bar{K}t$, $\bar{K}t_{UV}$, $\bar{K}t_{PAR}$ and $\bar{K}t_{IR}$) and monthly ratios UV/G, PAR/G and IR/G (\bar{K}_{UV} , \bar{K}_{PAR} and \bar{K}_{IR}) for the city of Botucatu, Brazil. The largest hourly values of solar radiation components occur in March (respectively 1.7MJ/m², 0.073MJ/m, 0.85MJ/m² and 0.79MJ/m²) and the smallest in July (respectively 1.37MJ/m², 0.052MJ/m², 0.67MJ/m² and 0.65MJ/m²). The largest daily values of solar radiation components occur in February (respectively 21.5MJ/m², 10.7MJ/m, 9.84MJ/m² and 0.92MJ/m²) and the smallest in June (respectively 13.05MJ/m², 0.504MJ/m², 6.36MJ/m² and 6.19MJ/m²). The broadband transmissivity is smaller in the cloudy and wet months (January) and larger in the month with large number of clear sky days (April): $\bar{K}t$ varies from 44.5% to 60.8%; $\bar{K}t_{UV}$ from 34.8% to 42.3%, $\bar{K}t_{PAR}$ from 57.7% to 74.8% and $\bar{K}t_{IR}$ from 36.4% to 53.2%. The ratios \bar{K}_{UV} and \bar{K}_{PAR} are larger and \bar{K}_{IR} smaller during the cloudy and wet months (January). On the other hand, \bar{K}_{UV} and \bar{K}_{PAR} are smaller and the ratio \bar{K}_{IR} larger during the dry, cloudless and with a large aerosol load months (August): \bar{K}_{UV} varied from 4.6% to 3.9%, \bar{K}_{PAR} from 50.7% to 48.2% and \bar{K}_{IR} from 44.6% to 48.3%.

Keywords. ultraviolet, photosynthetically active, infrared solar radiation.