

ANALISE SAZONAL DAS FRAÇÕES SOLARES K_t , K_{Dh} e K_d DA RADIAÇÃO GLOBAL EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

Dinival Martins - dinival@fca.unesp.br

João Francisco Escobedo - escobedo@fca.unesp.br

Enzo Dal Pai - edalpai@fca.unesp.br

Departamento de Recursos Naturais, FCA/UNESP, Botucatu, São Paulo, Brasil

Amauri Pereira de Oliveira - apdolive@usp.br

Jacyra Soares - jacyra@usp.br

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

Resumo. É apresentado no trabalho uma análise estatística do índice de claridade (K_t) e das frações direta (K_{Dh}) e difusa (K_d) da radiação global G , para uma base de dados das radiações global (G), direta na horizontal (D_h) e difusa (d), medidas no período de 1996 a 2006 em Botucatu/SP/Brasil. O valor médio total de K_t horário por estação do ano foi: inverno (52,3%), outono (52,2%), primavera (47,6%) e verão (46,0%), enquanto para K_t diário: inverno (57,9%), outono (57,1%), primavera (51,1%) e verão (48,9%). Similarmente, o valor médio total para K_{Dh} horário foi: outono (54,6%), inverno (53,6%), primavera (40,0%) e verão (38,7%), enquanto para K_{Dh} diário: inverno (59,3%), outono (59,0%), verão (44,3%) e primavera (45,7%). Igualmente, o valor médio total para K_d horário foi: verão (61,5%), primavera (59,7%), inverno (46,4%) e outono (45,4%), enquanto para K_d diário: verão (55,7%), primavera (54,3%), outono (41,0%) e inverno (40,7%).

Palavras-chave: Frações Solares; Radiações Solares Global, Difusa e Direta na Horizontal.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento sobre o índice de claridade solar ($K_t = G/H_0$) e das frações direta ($K_{Dh} = D_h/G$) e difusa ($K_d = d/G$) da radiação global (G), na superfície terrestre por meio de medidas ou modelos de estimativa, é de fundamental importância para elaboração de projetos de pesquisa otimizado ou de simulação de conversão em energia térmica, fotovoltaica ou biomassa, nas áreas de engenharia; climatologia; arquitetura; agronomia, entre outras. No Brasil, o conhecimento das radiações solar global, direta e difusa é restrito a pouquíssimos locais. A causa provável é a ausência de instrumentos nos laboratórios especializados ou estações meteorológicas, que medem rotineiramente uma ou duas dessas componentes, e em menor número ainda, são aqueles que medem simultaneamente as três radiações, como mostram os trabalhos de (Sousa *et al.*, 2005; Tiba *et al.*, 2005; Soares, *et al.*, 2004; Oliveira *et al.* 2002a, b; Cavalcanti, 1991; Oliveira *et al.*, 2006;). A Estação de Radiometria Solar da UNESP de Botucatu é um dos poucos laboratórios especializados em radiação solar que monitora as três componentes global, direta e difusa, com instrumentos de boa precisão e aquisição de dados automática desde 1996 para estudos climáticos e modelagem (Souza *et al.* 2010, Escobedo *et al.* 2011).

O objetivo deste trabalho foi calcular e efetuar uma análise climática sazonal (estações do ano) dos valores do índice de claridade e das frações direta e difusa da radiação global, (horária e diária) do período de 1996 a 2006. A base de dados de radiação global, direta e difusa, essa última calculada pelo método da diferença, é constituída de 10 anos, tempo este que permite, com razoável aproximação, determinar as tendências temporais das três frações durante o ano, podendo os resultados ser utilizados em locais com condições de coberturas de céu similares a Botucatu.

2. METODOLOGIA

2.1. Clima

As medidas foram realizadas no período de 1996 a 2006, na Estação de Radiometria Solar de Botucatu, FCA, UNESP, Botucatu-SP, com coordenadas geográficas: latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m. O clima local é temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno. Os elementos climáticos em Botucatu podem ser observados por meio dos valores médios mensais nas séries de temperatura, umidade, precipitação, insolação do período de 1970 a 2000 em Botucatu. A série de concentração de aerossóis é do período de 2000 a 2005, obtido por satélite TERRA (Fig1.).

A evolução anual da temperatura e umidade relativa média mensal segue a variação astronômica solar da declinação solar e do ângulo horário: os valores da temperatura e umidade relativa são maiores quando o sol declina mais próximo da latitude local e menor quando o sol declina no hemisfério norte. Os meses de fevereiro e julho são os meses mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,2°C e 17,1°C, enquanto que, fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente.

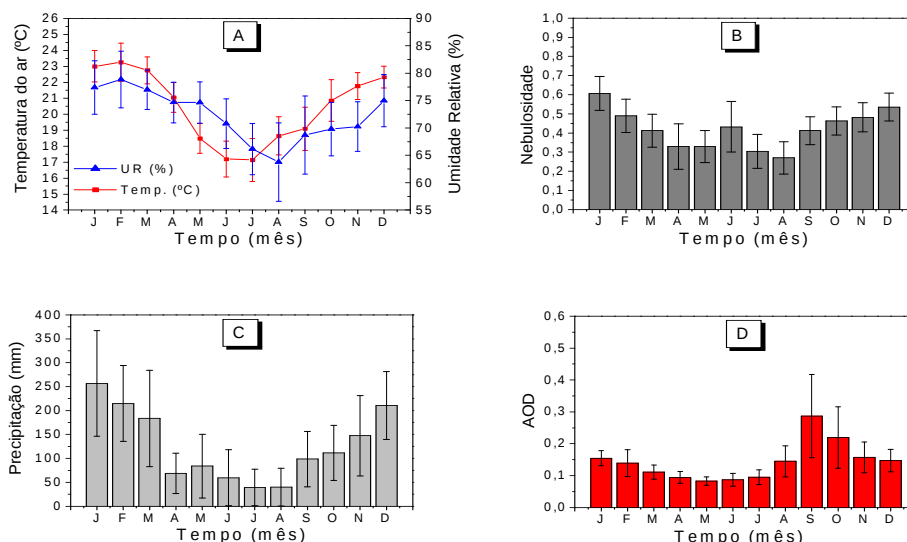


Figura 1 - Séries climáticas da temperatura(a), umidade relativa(a), nebulosidade(b) e precipitação(c), em Botucatu. A Fig. 1d mostra as série de concentração de aerossóis de 2000 a 2005, obtido por satélite TERRA

A nebulosidade é definida pela equação $f = 1 - n/N_e$ expressa o número de horas que o sol ficou encoberto numa razão de insolação n/N , onde n é o número de horas de brilho solar e N é o fotoperíodo (Iqbal, 1989). A evolução temporal da nebulosidade é proporcional às evoluções da temperatura e umidade relativa, na grande maioria dos meses. A exceção ocorre por conta dos meses de maio e junho, nos quais a nebulosidade aumenta, a baixos níveis de temperatura e umidade. Essa singularidade ocorre por conta das entradas das frentes frias vindas do sul do país que arrastam grandes quantidades de massas de ar frio, a partir da metade do outono, nos meses de abril e maio. A nebulosidade é mais elevada nos meses de janeiro ($f=0.61$) e menos elevada em agosto ($f=0.27$). Contrastando a nebulosidade, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229h e 175,28h respectivamente. O dia mais longo do ano (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho.

O ciclo da precipitação é constituído de períodos bem distintos, de acordo com o regime de chuvas: o período chuvoso e o período seco, onde os índices pluviométricos encontram-se abaixo do nível de 100mm. No período chuvoso, de outubro a março, concentrado nas estações da primavera e verão, quando ocorrem mais de 80% do total anual de chuvas, a precipitação é de natureza convectiva, originada do processo de convecção livre, e de eventos macroclimáticos originados como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e Sistemas Frontais do Atlântico Sul. No período seco de abril à setembro, nas estações de 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 do Brasil, típicas das latitudes médias. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm (Fig. 1b).

Botucatu conta com 120.800 habitantes e é uma cidade do tipo universitária, inserida em uma região rural com plantações de cana de açúcar e eucaliptos. Nos meses do período da seca, a partir de junho até novembro, a atmosfera local apresenta elevada concentração de materiais particulados provenientes das queimadas da cana de açúcar e das usinas que produzem açúcar e álcool. A evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite TERRA do período de 2000 a 2005 (Fig. 1d), mostra que do início das queimadas da cana-de-açúcar em julho, a concentração de aerossóis mensal aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de $AOD=0.35$ em setembro, o que é equivalente a concentração PM_{10} de $70.0 \mu g.m^{-3}$ (Codato *et al.* 2008).

2.2. Instrumentação

A irradiância global (I_G) foi monitorada por um piranômetro Eppley PSP enquanto a direta na incidência (I_b) por um pireliômetro Eppley NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. A irradiância difusa (I_d) foi gerada pelo método indireto, ou seja, pela diferença entre a irradiância I_G e a irradiância direta na horizontal I_{Dh} , calculada na mesma frequência, por meio da equação: $I_d = I_G - I_{Dh} = I_G - I_b \cos z$, onde $I_{Dh} = I_b \cos z$, z é o ângulo zenital. Os erros das medidas da radiação global e direta estão associados à precisão dos aparelhos da Eppley: o piranômetro PSP que mede a radiação global possui uma incerteza da ordem de 1,5% a 2,0%, enquanto que, o pireliômetro que mede a radiação direta de 1,5% a 2,0%. Assim de acordo com a teoria de propagação de erro, a radiação difusa que foi obtida por diferença por meio da equação: $I_d = I_G - I_b \cos z$ apresenta um erro estimado de 3,5% a 4,0%.

Na aquisição dos dados foi utilizado Datalogger da Campbell CR23X operando na frequência de 1 Hz, armazenando médias instantâneas de 5 minutos. Os dados passam por um controle de qualidade onde são eliminados os valores espúrios e numa segunda etapa, os dados são processados para o cálculo das frações médias sazonais horárias e diárias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Fração Média Anual e Total por Estação do Ano

A Fig. 2a, 2b, 2c e 2d mostra a evolução das frações médias K_t , K_{Dh} e K_d , (horárias) no verão, outono, inverno e primavera, de cada ano no período de 1996 a 2006. Na figura é apresentada também os valores das frações médias totais K_t , K_{Dh} e K_d horária sobre os 11 anos, com seus respectivos desvios das médias. Os valores médios totais das frações horárias e desvios de cada estação do ano foram: verão $K_t = (46,0\% \pm 6,5\%)$; $K_{Dh} = (38,7\% \pm 12,8\%)$ e $K_d = (61,3\% \pm 8,1\%)$; primavera $K_t = (47,6\% \pm 5,1\%)$; $K_{Dh} = (40,3\% \pm 10,4\%)$ e $K_d = (59,7\% \pm 7,0\%)$; outono $K_t = (52,2\% \pm 4,6\%)$; $K_{Dh} = (54,6\% \pm 7,1\%)$ e $K_d = (45,4\% \pm 8,5\%)$ e inverno $K_t = (52,3\% \pm 4,1\%)$; $K_{Dh} = (53,6\% \pm 6,5\%)$ e $K_d = (46,4\% \pm 7,5\%)$.

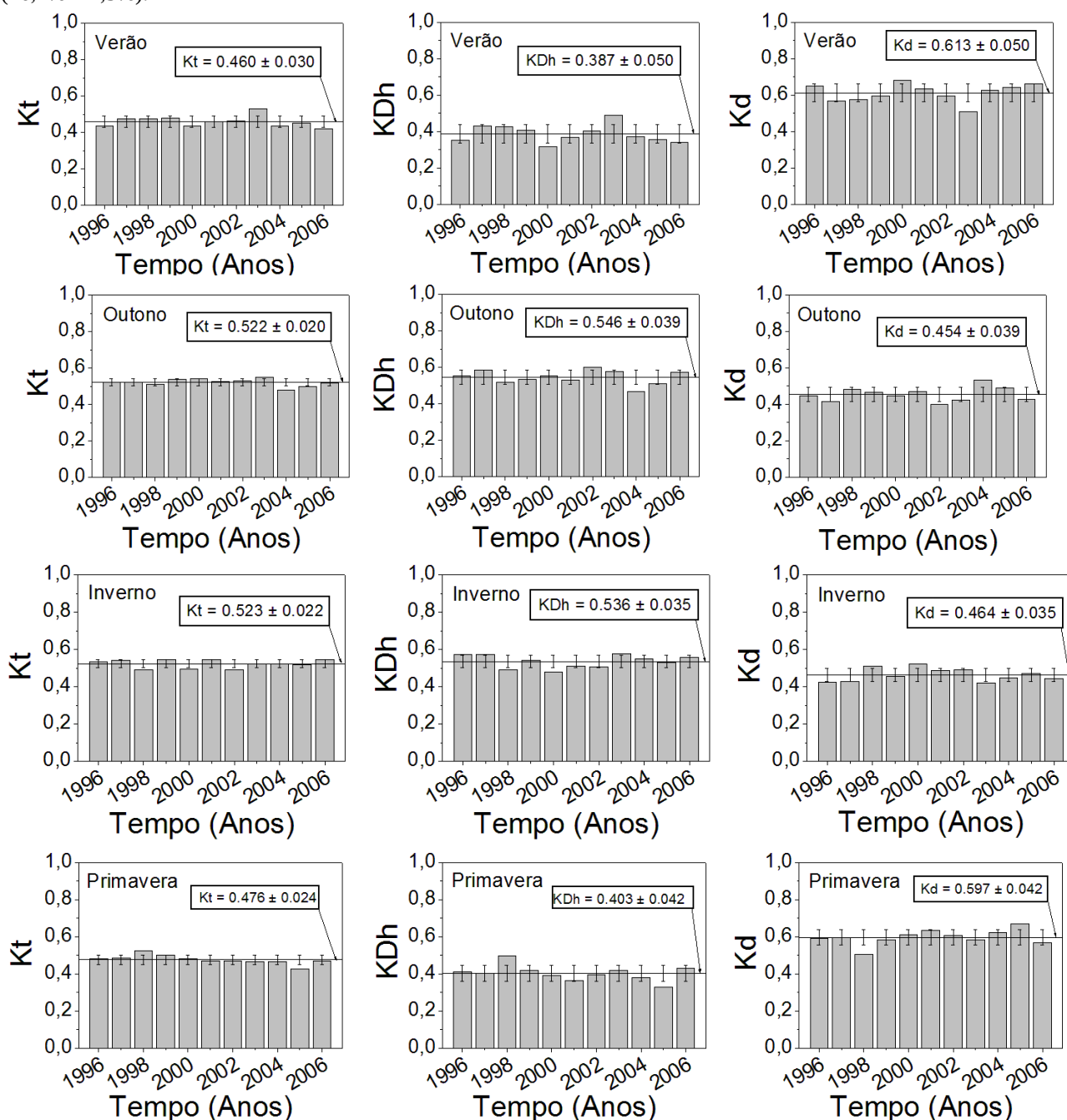


Figura 2 - Evolução das frações médias K_t , K_{Dh} e K_d , horárias no verão, outono, inverno e primavera, de cada ano e total no período de 1996 a 2006.

A Fig. 3 mostra a evolução das frações médias K_t , K_{Dh} e K_d , (diários) no verão, outono, inverno e primavera, de cada ano no período de 1996 a 2006. Na figura é apresentada também os valores das frações médias totais K_t , K_{Dh} e K_d , diários sobre os 11anos, com seus respectivos desvios das médias.

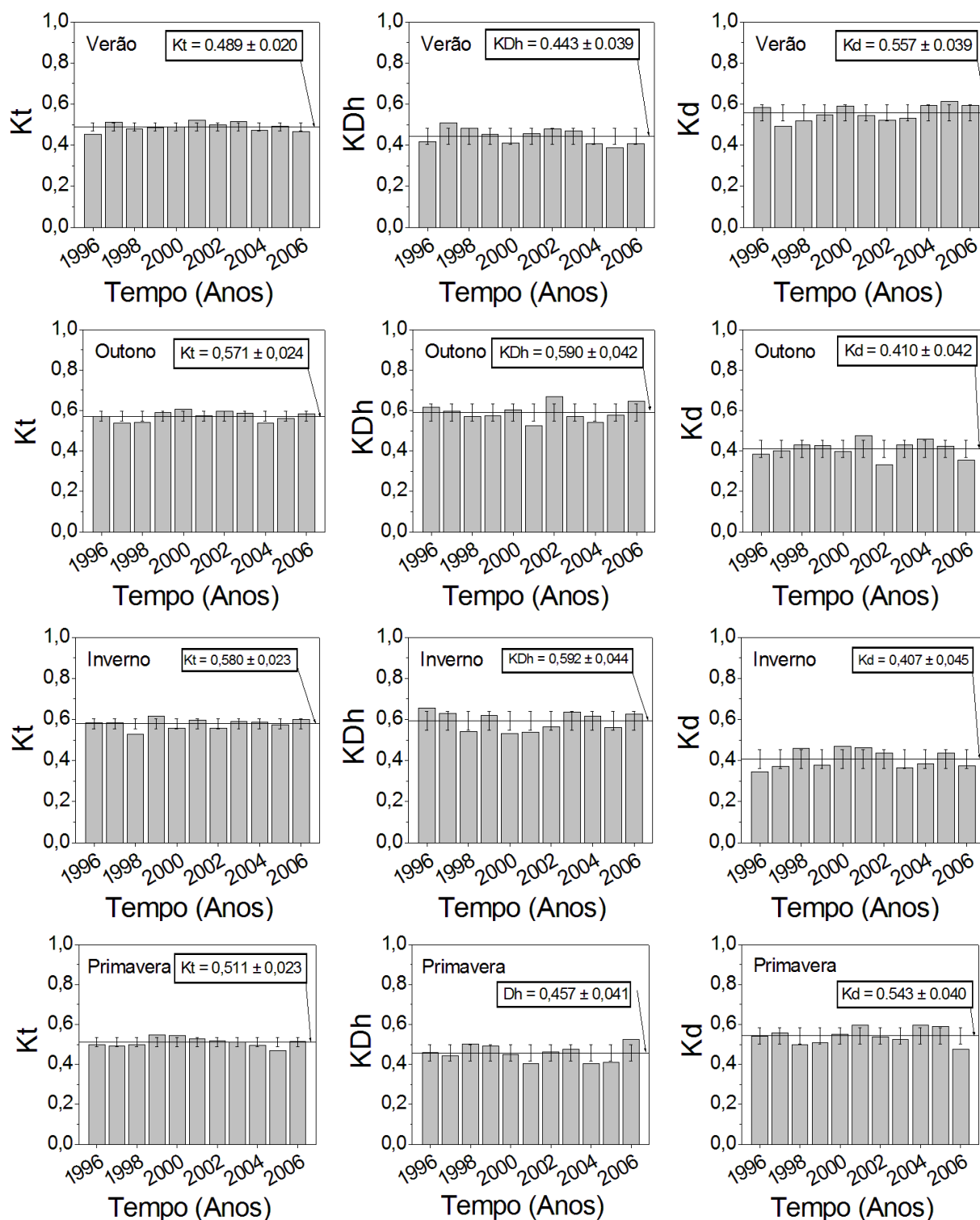


Figura 3 - Evolução das frações médias K_t , K_{Dh} e K_d , diárias no verão, outono, inverno e primavera, de cada ano e total, no período de 1996 a 2006.

Similarmente, os valores das frações médias totais diárias e desvios foram: verão $K_t = (48,9\% \pm 4,2\%)$; $K_{Dh} = (44,3\% \pm 8,9\%)$ e $K_d = (55,7\% \pm 7,1\%)$; primavera $K_t = (51,1\% \pm 4,6\%)$; $K_{Dh} = (45,7\% \pm 8,9\%)$ e $K_d = (54,3\% \pm 7,5\%)$; outono $K_t = (57,1\% \pm 4,3\%)$; $K_{Dh} = (59,0\% \pm 7,2\%)$ e $K_d = (41,0\% \pm 10,4\%)$ e inverno $K_t = (58,0\% \pm 4,1\%)$; $K_{Dh} = (59,2\% \pm 7,6\%)$ e $K_d = (40,7\% \pm 11,1\%)$.

Os valores das frações K_t e K_{Dh} médias totais horárias foram inferiores aos valores das frações médias totais diárias, enquanto que o valor médio total horário da fração K_d foi superior ao valor da fração médio total diário nas quatro estações do ano.

3.2. Variabilidade das Frações Média $\bar{K}_t$, $\bar{K}_D$ e $\bar{K}_d$ entre Anos

O desvio percentual entre a fração média sazonal de cada ano e a fração média sazonal total, no período de 1996 a 2006, calculada pela equação abaixo, expressa a variabilidade das frações sazonal K_t , K_D e K_d por ano. Os resultados das três frações, nas estações verão, outono, inverno e primavera, estão representados nas Fig. 4,5,6 e 7 (a) horária e (b) diária. Os desvios $D(\%)$ foram diferentes entre as frações K_t , K_D e K_d e entre as estações do ano. Entre as frações, os desvios de K_t , horários e diários, nas quatro estações foram menores que os desvios das frações K_d e K_{Dh} em sequência respectivamente; e entre as estações nas duas partições, o verão apresentou os maiores desvios para as três frações K_t , K_{Dh} e K_d ;

$$D(\%) = \left(\frac{\text{fração média sazonal do ano} - \text{fração média sazonal total}}{\text{fração média sazonal total}} \right) * 100$$

Do ponto de vista climático, qualquer valor das frações K_t , K_D e K_d médio anual, nas quatro estações, inferior ou superior, ao intervalo de variação do valor médio total ($\pm$ desvio) mostrado nas Fig. 4,5,6 e 7 (horária e diária), representa uma não concordância ou uma não previsão da série dos onze anos em função de variações climáticas atípicas. Os resultados mostram que na maioria dos anos, os valores médios das frações K_t , K_D e K_d médios anuais nas quatro estações do ano, estão dentro do previsto pela normal da série do período de 1996 a 2006, com melhores resultados para a partição horária. Os desvios horários e diários representam nas Fig. 4,5,6 e 7 mostram que a variabilidade anual das radiações sazonais, não são iguais ano a ano. Nestas figuras os gráficos horários estão na linha (a) e os gráficos diários estão na linha (b).

3.2.1. Verão

O desvio ($D\%$) da fração $\bar{K}_t$ horária variou de -8,6% (2006) a 15,3% (2003), ambos externos ao desvio da média $\pm 6,5\%$ da série; o desvio ($D\%$) de K_{Dh} horária variou de -18,2% (2000) a 26,4% (2003) ambos externos ao desvio médio de $\pm 12,8\%$ da série, e o desvio ($D\%$) de K_d horária variou de 15,5% (2000) a -16,7% (2003) ambos externos ao desvio médio de $\pm 8,1\%$ da série. Similarmente, o desvio ($D\%$) no verão para a fração K_t diária variou de -7,2% (1996) a 6,4% (2001), ambos externos ao desvio médio de $\pm 4,2\%$ da série; o desvio ($D\%$) de K_{Dh} diário ($D\%$) variou de -12,7% (2005) a 14,8% (1997) ambos externos ao desvio médio de $\pm 8,9\%$ da série e o desvio ($D\%$) de K_d diário variou de -11,7% (1997) a 10,1% (2005) ambos externos ao desvio médio de $\pm 7,1\%$ da série.

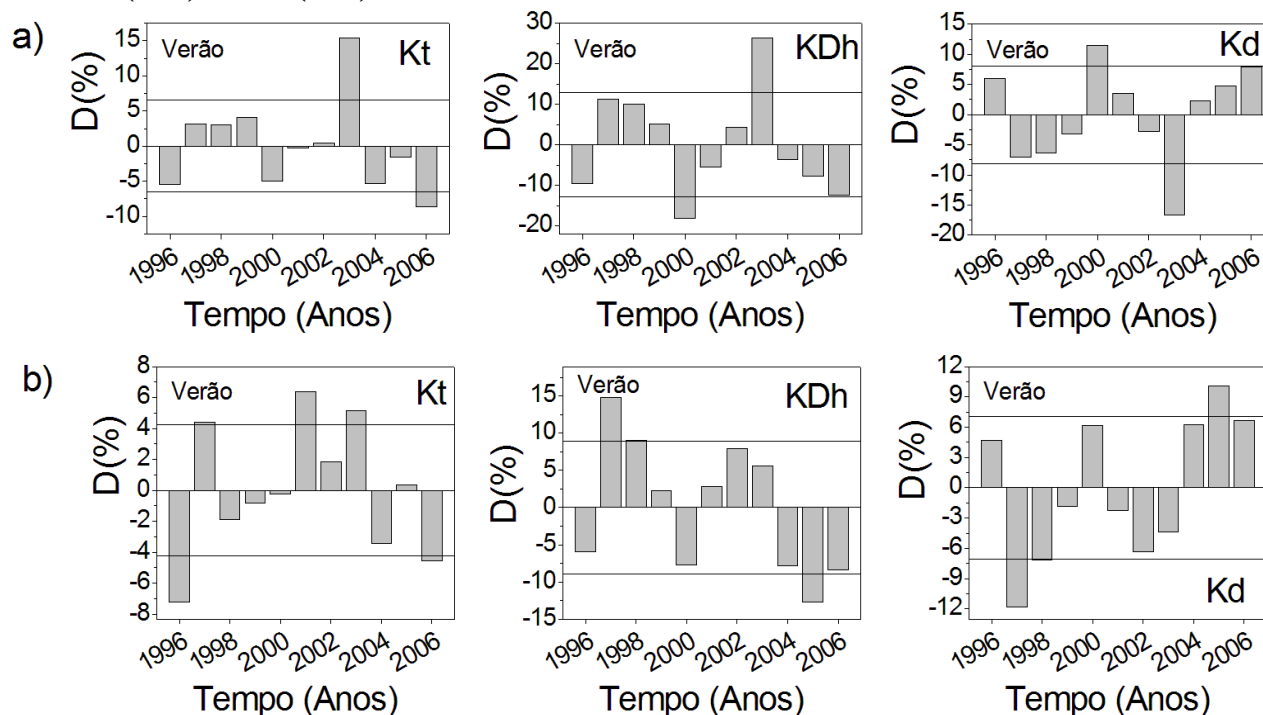


Figura 4 - O desvio($D\%$) no verão das frações K_t , K_{Dh} e K_d horária (a) e diária (b).

3.2.2. Outono

O desvio(D%) no outono Kt horário variou de 5,6% (2003) a -7,9% (2004), ambos externos aos desvios médio de $\pm 3,8\%$ da série; o desvio (D%) de K_{Dh} horária variou de 9,8% (2002) a -14,5% (2004) ambos externos ao desvio médio de $\pm 7,1\%$ da série; o desvio (D%) de K_d horária variou de -11,8% (2002) a 17,4% (2004) ambos externos ao desvio médio de $\pm 8,5\%$ da série. Similarmente, a fração Kt diária variou de -6,04% (1998) a 6,4% (2001), ambos externos ao desvio médio de $\pm 4,3\%$ da série; o desvio (D%) de K_{Dh} diária variou de -11,5% (2001) a 13,3% (2002) ambos externos ao desvio médio de $\pm 7,2\%$ da série, e o desvio (D%) de K_d diário variou de -19,1% (2002) a 15,9% (2001) ambos externos de $\pm 10,5\%$ da série.

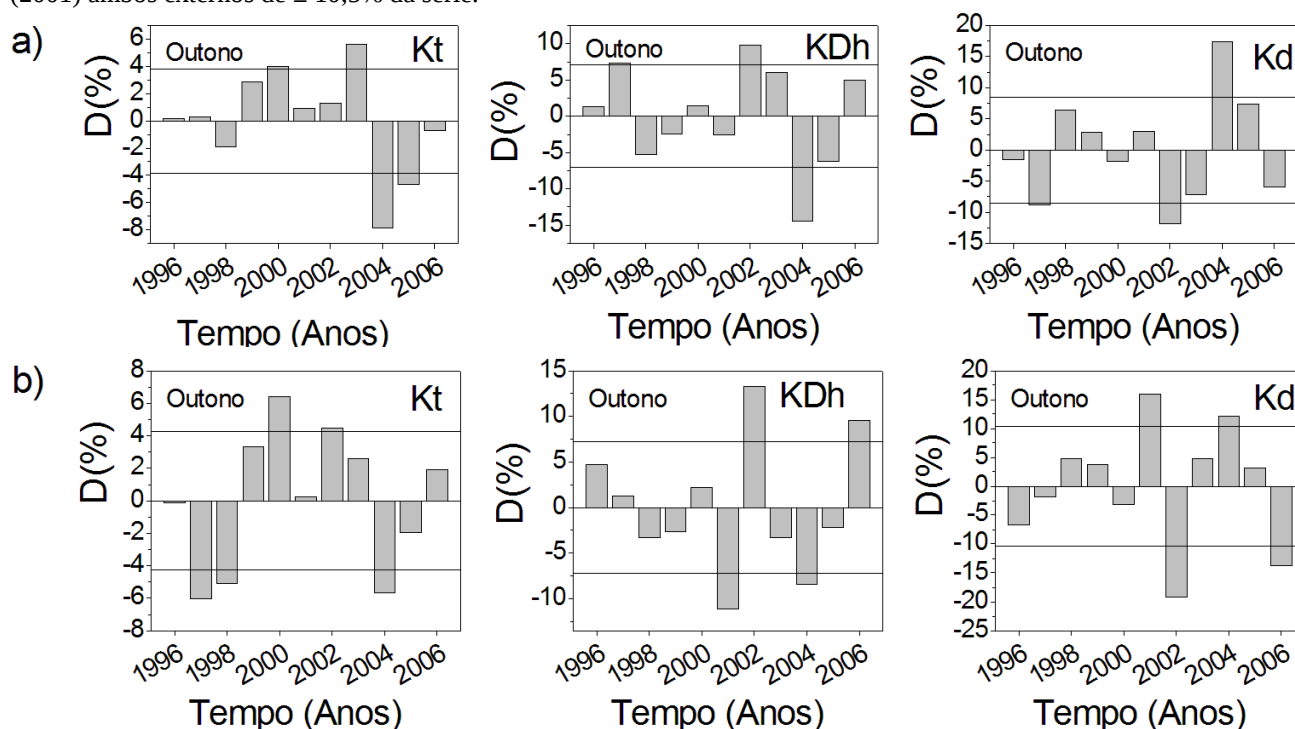
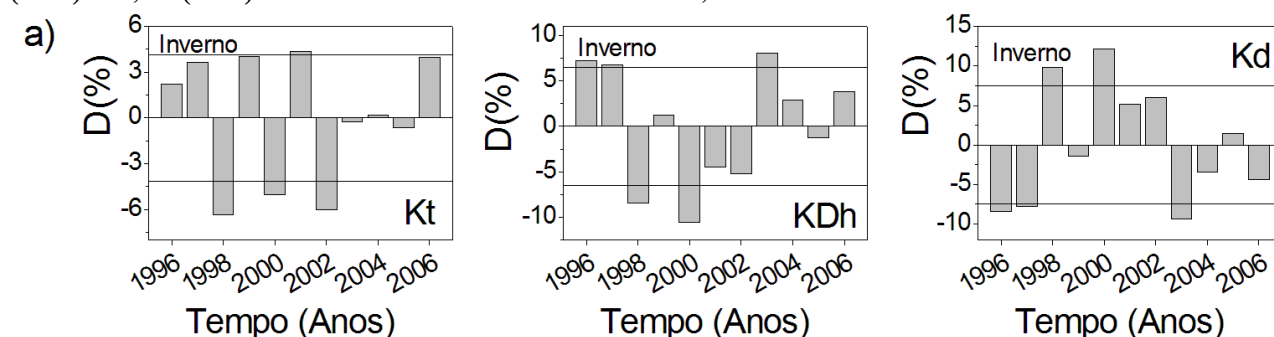


Figura 5 - O desvio(D%) no outono das frações Kt, K_{Dh} e K_d horária (a) e diária (b).

3.2.3. Inverno

O desvio (D%) de Kt horário no inverno variou de -6,3 (1998) a 4,3% (2001), ambos externos ao desvio médio de $\pm 4,1\%$ da série; o desvio (D%) de K_{Dh} horária variou de -10,5% (2000) a 8,1% (2004) ambos externos ao desvio médio de $\pm 6,5\%$ da série, e o desvio (D%) de K_d horária variou de -9,3% (2003) a 12,1% (2004) ambos externos ao desvio médio de $\pm 7,5\%$ da série. Similarmente, o desvio (D%) para a fração Kt diária no inverno foi de -8,8% (1998) a 6,1% (1999), ambos externos ao desvio médio de $\pm 4,2\%$ da série, o desvio (D%) de K_{Dh} diário variou de -10,5% (2000) a 10,4% (1996) ambos externos ao desvio médio de $\pm 7,6\%$ da série, e o desvio (D%) de K_d diário variou de -15,1% (2003) a 15,3% (2000) ambos externos ao desvio médio de $\pm 11,1\%$ da série.



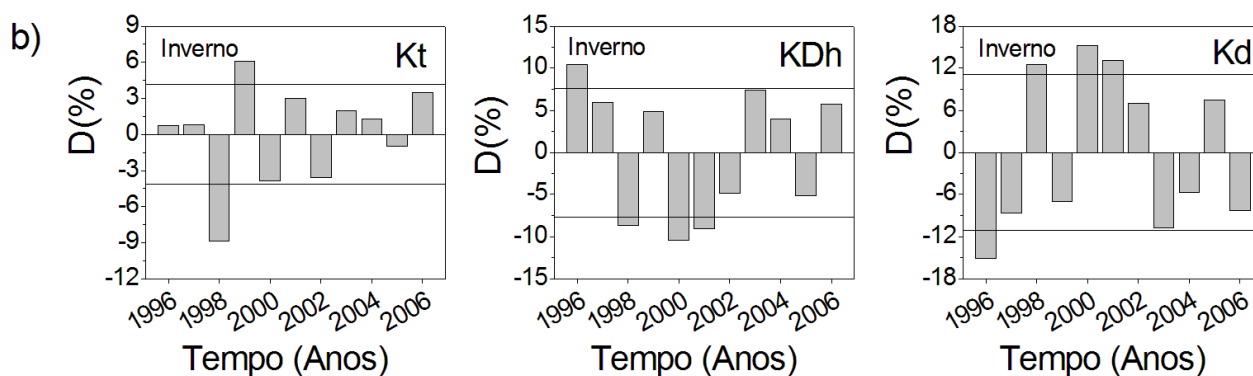


Figura 6 - O desvio(D%) no inverno das frações Kt, K_{Dh} e K_d horária (a) e diária (b).

3.2.4. Primavera

O desvio (D%) da fração Kt horária na primavera variou de -10,8 (2005) a 9,9% (2005), ambos os desvios estão abaixo e acima do desvio padrão de $\pm 4,1\%$ da série; o desvio (D%) de K_{Dh} horária variou de -18,1% (2005) a 22,9% (1998) ambos os desvios estão abaixo e acima do desvio padrão de $\pm 10,4\%$ da série, e o desvio (D%) de K_d horária variou de -15,5% (1998) a 12,2% (2005) ambos estão abaixo e acima do desvio padrão de $\pm 6,9\%$ da série. Similarmente, o desvio (D%) para a fração Kt diária no inverno foi de -8,1% (1998) a 7,5% (1999), ambos os desvios estão abaixo e acima do desvio padrão de $\pm 4,6$ da série; o desvio (D%) de K_{Dh} diário variou de -11,8% (2004) a 14,8% (2006) ambos estão abaixo e acima do desvio padrão de $\pm 9,0\%$ da série e o desvio (D%) de K_d diário variou de -12,4% (2006) a 9,9% (2001) ambos estão abaixo e acima do desvio padrão de $\pm 7,5\%$ da série.

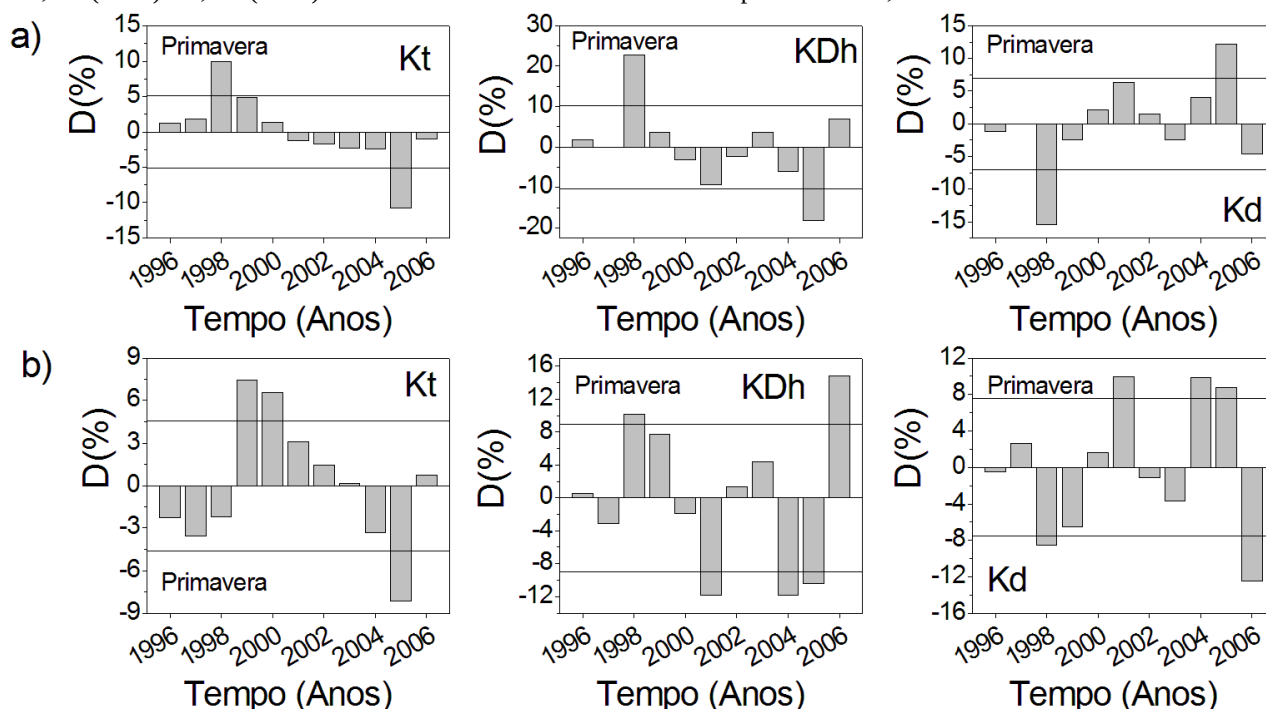


Figura 7 - O desvio(D%) na primavera das frações Kt, K_{Dh} e K_d horária (a) e diária (b).

4. CONCLUSÕES

As evoluções periódicas sazonais de Kt, K_{Dh} e K_d horária e diária, são resultantes das variações da concentração de nuvens, vapor d'água e aerossóis na atmosfera. Os valores de Kt são mais elevados nas estações de baixa concentração de nuvens e vapor d'água e alta concentração de aerossóis na atmosfera: outono e inverno, e são menos elevados nas estações de elevadas concentração de nuvens e vapor d'água: verão e primavera. Os valores de Kt horário foram: verão (46,0%) outono (52,2%), inverno (52,3%) e primavera (47,6%); enquanto que K_{Dh} horário foram: verão (38,7%), outono (54,6%), inverno (53,6%) e primavera (40,3%). Em contraste, valores de K_d horários são mais elevados nas estações de alta concentração de nuvens e de vapor d'água e baixa a concentração de aerossóis na atmosfera: outono e inverno, e são menos elevados nas estações de elevada concentração de nuvens e vapor d'água: verão e primavera. Os valores de K_d horários em média, foram: verão (61,3%), outono (45,40%), inverno (46,4%) e

primavera (39,7%). Similarmente, os valores de K_t diários, em média foram: verão (48,9%), outono (57,1%), inverno (57,9%) e primavera (51,1%); enquanto que K_{Dh} horário, em média, foram: verão (44,3%), outono (59,0%), inverno (59,2%) e primavera (45,7%). Enquanto que, os valores de K_d horários em média, foram: verão (55,7%), outono (41,0%), inverno (40,7%) e primavera (54,3%).

Agradecimentos

Agradecimento à FAPESP e CNPQ pelo apoio financeiro a este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Cavalcanti, E.S.C., 1991. Analysis of experimental solar radiation for Rio de Janeiro, Brazil. *Solar Energy*, v.47, p.231-235.
- Codato, G., Oliveira, A. P., Soares, J., Escobedo, J. F., Gomes, E.N., Dal Pai, A., 2007. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast of Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v.1, p.12.
- 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.
- Escobedo, J. F., Gomes, E.N., Oliveira, A. P., Soares, J., 2009. Ratios uv, par and nir components of global solar radiation at surface measured at Botucatu site in brazil. *Renewable Energy*, v.2, p.10.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press, 1983. 390 p.
- Oliveira, A.P., Escobedo, J.F., Machado, A.J., Soares, J., 2002. Correlation models of diffuse-solar radiation applied to the city of São Paulo, Brazil. *Applied Energy*, v.71, p.59-73.
- Oliveira, A.P., Machado, A.J., Escobedo, J.F., Soares, J., 2002. Diurnal evolution of solar radiation at the surface in the city of São Paulo: seasonal variation and modeling. *Theor. Appl. Clim.*, v.71, p.231-250.
- Soares, J., Oliveira, A.P., Boznar, M.Z., Mlakar, P., Escobedo, J.F., Machado, A.J., 2004. Modeling hourly diffuse solar radiation in the city of São Paulo using a neural-network technique. *Applied Energy*, v.79, p.201-204.
- [Souza, A.P.](#); Escobedo, J. F.; [DalPai, A.](#); [Gomes, E.N.](#), 2010. Estimativa da Radiação Global Incidente em Superfícies Inclinadas por Modelos Isotrópicos e Índice de Claridade. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* (1977. Impressa), v. 45, p. 339-350.
- Souza, J.L., Nicácio, R.M., Moura, M.A.L., 2005. Global solar radiation measurements in Maceió, Brazil. *Renewable Energy*, v.30, p.1203-1220.
- Tiba, C. Aguiar, R., Fraidenraich., 2005. N. Analysis of a new relationship between monthly global irradiation and sunshine hours from a database of Brazil. *Renewable Energy*, v.30, p.957-966.

SEASONAL ANALYSIS OF K_t , K_{Dh} AND K_d SOLAR FRACTIONS IN BOTUCATU/SP/BRAZIL.

Abstract. This work presents a statistical and climate analysis of the clearness index (K_t) and of the fractions of radiation directly (K_{Dh}) and diffuse (K_d) of global radiation G , for a seasonal database of solar radiations global (G), direct on a horizontal surface (D_h) and diffuse (d) measures in the period 1996 to 2006 in Botucatu, Brazil. The seasonal hourly average values of K_t over all the years were: winter (52.3%), autumn (52.2%), spring (47.6%) and summer (46.0%), whereas the K_t daily: winter (57.9%), autumn (57.1%), spring (51.1%) and summer (48.9%). Similarly, the mean values of hourly K_{Dh} were: autumn (54.6%), winter (53.6%), spring (40.0%) and summer (38.7%), while the daily K_{Dh} : winter (59.3%), autumn (59.0%), summer (44.3%) and spring (45.7%). Also, the average hourly values of K_d were: summer (61.5%) spring (59.7%), winter (46.4%) and autumn (45.4), whereas the daily K_d : summer (55.7%), spring (54.3%), autumn (41, 0%) and winter (40.7%).

Key words: Solar Fractions; Global Solar Radiation, Diffuse and Direct on a Horizontal Surface.