# DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DAS COBERTURAS DE CÉU EM BOTUCATU/SP

### Érico Tadao Teramoto – ericoengineer@fca.unesp.br João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Departamento de Ciências Ambientais

**Resumo.** Neste trabalho é apresentada uma análise da variação das coberturas de céu em Botucatu/SP/Brasil, classificadas com base no índice de claridade  $K_T$ , no período de 1995 a 2006. Foram determinadas a freqüência diária mensal média das coberturas de céu: I - nebuloso ( $K_T < 0.35$ ); II - parcialmente nebuloso com dominância para o difuso ( $0.35 < K_T \le 0.55$ ); III - parcialmente nebuloso com dominância para o difuso ( $0.35 < K_T \le 0.55$ ); III - parcialmente nebuloso com dominância para o claro ( $0.55 < K_T \le 0.65$ ) e IV - claro ( $K_T > 0.65$ ). As freqüências para as coberturas de céu I e II são maiores no período chuvoso (de outubro a fevereiro), no qual a concentração de nuvens e vapor de água é mais elevada no ano, e é menor no período seco (de abril a agosto), onde predominou a cobertura de céu IV. Janeiro apresentou o maior valor de freqüência média da cobertura de céu I ( $29.78\% \pm 12.82$ ) e julho o menor ( $9.50\% \pm 5.43$ ). Para a cobertura de céu II, janeiro apresentou o maior valor de freqüência média ( $41.23\% \pm 7.76$ ) e agosto o menor ( $13.57\% \pm 7.08$ ). Para a cobertura de céu IV, agosto apresentou o maior valor de freqüência média ( $53.80\% \pm 20.20$ ) e janeiro o menor ( $7.70\% \pm 5.08$ ). Dentro da evolução diurna, as freqüências da cobertura de céu I, em todos os meses, decrescem dos intervalos horários do inicio e fim do dia para os intervalos horários no meio do dia, acompanhando de forma inversa a evolução diurna da massa ótica, enquanto que para a cobertura de céu IV, ela aumenta como uma função parabólica do inicio para o final do fotoperíodo.

Palavras-chave: Radiação Solar, Cobertura de céu, Índice de claridade, Nebulosidade.

## 1. INTRODUÇÃO

A radiação solar, em qualquer localidade, é uma das variáveis meteorológicas mais afetadas pela presença de nuvens sobre o céu, pois as nuvens são as principais atenuadoras da radiação solar ao absorver grande parcela da radiação no comprimento de onda do infravermelho e ao atenuar por difusão e reflexão a componente direta (Iqbal, 1983; Kinsell, 1975; Molineaux e Ineichen, 1995), ou seja, diferentes condições de cobertura de céu resultam em diferentes padrões da radiação solar global. Por isso, para efeito de estudos dos níveis de radiação incidente sobre a superfície terrestre em função das condições de cobertura de céu, a atmosfera terrestre é classificada em dois amplos tipos: com nuvens e sem nuvens (Iqbal, 1983). A máxima incidência da radiação sobre qualquer superfície na Terra é recebida sob condições de céu sem nuvens, e nestas condições a turbidez atmosférica é determinante na atenuação (Iqbal, 1983; Mosalam Shaltout et al., 2001; Ogunjobi et al., 2002). A maioria dos trabalhos presentes em literatura classifica as condições de cobertura de céu em nebuloso, parcialmente nebuloso e céu claro, sendo esta classificação normalmente feita com base em índices calculados a partir de dados medidos ou estimados de radiações, como o índice de claridade K<sub>T</sub>, índice K<sub>d</sub>, e os parâmetros meteorológicos número de horas de brilho solar e a razão de insolação. O índice de claridade K<sub>T</sub>, razão entre a radiação global e a extraterrestre, serve como um indicativo das condições atmosféricas ao expressar quanto da radiação solar extraterrestre é transmitida pela atmosfera antes de incidir sobre a superfície terrestre, mostrando com maior clareza as variações da radiação global em função do clima, ou seja, elimina as dependências astronômicas e geográficas (Liu e Jordan, 1960). Segundo Kudish e Ianetz (1996), é uma medida integral da quantidade e tipo de condição de nuvens, indicando de maneira objetiva a influência da condição de nebulosidade sobre o fluxo de radiação solar. O índice K<sub>d</sub>, razão entre a radiação solar difusa e a global, serve de indicativo da capacidade da atmosfera sobre o local considerado em difundir a radiação.

Informações médias das condições de condição do céu são utilizadas em modelos para estimativa da radiação solar, como os propostos por Angström (1924), o qual estima a radiação solar global diária com base na razão de insolação, e por Liu e Jordan (1960), que utiliza para caracterização das condições de céu a fração  $K_T$  (razão entre a radiação solar global e a extraterrestre). Também, tais informações são úteis em estudos ecológicos, hidrológicos, agronômicos, de planejamento e desenvolvimento do turismo e na engenharia, em projetos e simulações para estimar o desempenho de sistemas que utilizem energia solar ou que sejam influenciados por ela (iluminação natural e conforto térmico) (Udo, 2000; Li e Lan, 2001). Tendo como exemplo os sistemas de aquecimento solar de água, em dias de céu nebuloso, faz-se necessário o uso de um sistema de aquecimento elétrico complementar ao solar. Portanto, para uma projeção da redução no consumo de energia elétrica a partir da utilização da solar, além da quantidade média de energia solar disponível, torna-se interessante ter o conhecimento da freqüência de dias de céu nebuloso na localidade.

Com base na importância da caracterização das condições de céu, Kudish e Ianetz (1996) estudaram a evolução anual das condições de céu em Beer Sheva (latitude 31,25° N, longitude 34,75° E) em Israel, a partir do índice de claridade  $K_T$  calculado utilizando dados de radiação global medida ao longo de 10 anos. Verificaram que os meses com maior e menor valor de freqüência de dias de céu claro são, respectivamente, junho (72%) e dezembro (6%) e que ao longo do ano 7% dos dias são de céu nebuloso, 54% parcialmente nebuloso e 39% de dias de céu claro. Li e Lam (2001) verificaram que, em Hong Kong (latitude 22,3° N, longitude 114,2° E), ao longo do ano, 23% do fotoperíodo é representado por céu nebuloso, 80% por céu parcialmente nebuloso e 7% de céu claro. Ogunjobi et al. (2002), verificaram que 32% dos dias do ano em Ile-Ife (latitude 7,14° N, longitude 4,56° E) são de céu claro, com maior freqüência no período seco do ano (novembro-abril), enquanto em Kwangju (Latitude 35,13° N, longitude 126,53° E) é de 5% e em Seoul (latitude 37,57° N, longitude 126,98° E) é de 4%, sendo estes baixos valores de freqüência encontrados para as duas últimas cidades influência da elevada turbidez atmosférica resultante da queima de biomassa agrícola e da poeira oriunda do deserto de Gobi. Che et al. (2007) estudaram as condições de céu para 14 cidades da China, analisando as variações sazonais ao longo de 40 anos, e verificaram que para a maioria das cidades houve reduções gradativas de ocorrência de dias de céu claro em função do aumento gradativo da emissão de aerossóis resultante do aumento da queima de combustíveis.

Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise da distribuição de freqüência das coberturas de céu em Botucatu/SP, evolução anual diária e diurna mensal, com base no índice de claridade  $K_T$  e na variação climática, no decênio de 1995 a 2006. O desenvolvimento desta pesquisa, além do interesse dentro da área de engenharia e arquitetura, guarda interesse também nas áreas da climatologia, meteorologia e ambiental, pois a atmosfera da região recebe todos os anos no período da seca, entre julho e novembro, elevadas concentrações de materiais particulados resultantes da queima da cana-de-açúcar, sendo ainda desconhecido o efeito dessas emissões sobre a freqüência das condições de cobertura de céu no município. Além disto, o município estar inserido em uma região com extensas áreas cobertas por represas, que influenciam a presença de vapor de água na atmosfera local.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 2.1. Localização e clima

Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°W, altitude 786 m), distante 221 km do Oceano Atlântico, conta com 120,8 mil habitantes (IBGE, 2007). É uma cidade do tipo universitária, inserida em uma região rural com plantações de cana de açúcar e eucaliptos. Conta com cerca de 4% de sua área territorial (1.483 km<sup>2</sup>) ocupado por cana-de-açúcar, com rendimento médio aproximado de 70 to/ha. Não possui grandes indústrias. De acordo com dados do IBGE (2007), a frota de veículos automotores para a cidade de Botucatu em 2008 é de 56,38 mil (aproximadamente 1 veículo para cada 2 habitantes), incluindo automóvel (39.359), caminhão (1.359), caminhão trator (134), caminhonete (3.722), ônibus (387), micro-ônibus (198), motocicleta (9.799), trator de rodas (26) e motoneta (1.396).

O clima do município é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido e o inverno é seco. Os efeitos climáticos característicos que afetam diretamente os valores das radiações solares em Botucatu podem ser observados por meio dos valores médios mensais nas séries de temperatura, umidade, precipitação e insolação mostrados na Fig.1. Analisando a evolução anual média mensal de 35 anos de dados, percebemos que os meses de fevereiro e julho são o mais quente e o mais frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de 23,12 °C e 17,10 °C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,25% e 63,97% respectivamente. A evolução anual da temperatura e umidade relativa média mensal segue as variações astronômicas do sol, onde os valores são maiores quando o sol declina mais próximo da latitude local (radiação solar mais elevada) e menores valores quando declina no hemisfério norte (radiação solar menos elevada).



**Figura 1.** a) Evolução anual da temperatura e umidade médias mensais de 35 anos; b) Evolução anual da precipitação e número de horas de brilho solar acumulados médios anuais (35 anos).

A precipitação é mais elevada nos meses de janeiro (246,22mm), fevereiro (199,13mm), março (172,33mm), outubro (106,19mm), novembro (139,05mm), dezembro (201,42mm) e menores em abril (66,77mm), maio (80,24mm), junho (55,75mm), julho (37,54mm), agosto (36,10mm), setembro (87,54mm), como ilustra a Fig. 1b.

Anualmente, o ciclo da precipitação é constituído de períodos bem distintos: o período chuvoso (outubro a março) e o período seco (abril à setembro), 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. A chuva convectiva é localizada e com grande variabilidade espacial; a intensidade é moderada a forte dependendo do desenvolvimento vertical da nuvem; a predominância é no período da tarde ou início da noite, e a duração, é curta à média, de minutos à horas. São provocadas pela intensa evapotranspiração de superfícies úmidas e aquecidas. O ar ascende em parcelas de ar que se resfriam de forma praticamente adiabática (sem trocar calor com o meio exterior) durante sua ascensão.

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. Por ser mais pesado, o ar frio faz o ar quente subir na atmosfera. Com a subida da massa de ar quente e úmida, há um resfriamento da mesma que condensa e forma a precipitação. A distribuição da chuva 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.

Com relação à emissão de materiais particulados na atmosfera, no período da seca apresenta uma atmosfera sujeita à materiais particulados proveniente das queimadas da cana-de-açúcar feitas em aproximadamente 70 cidades adjacentes e das usinas que produzem o álcool e açúcar. Segundo Codato et al. (2008), com base em dados de materiais particulados PM<sub>10</sub> (com diâmetro aerodinâmico menor que 10 µm) medidos pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) no ano de 2004 em Jaú, considerando estes dados representativos para Botucatu/SP, dada a proximidade entre as duas cidades (distantes 80 km uma da outra), a partir do início das queimadas da cana em maio/junho, a concentração de aerossóis aumenta consideravelmente, atingindo no mês de setembro o valor máximo de  $PM_{10}$  de 70.0  $\mu$ m<sup>-3</sup>. O ciclo da colheita da cana de açúcar termina no mês de novembro devido a dificuldade do transporte da matéria prima, no período chuvoso. Nos meses de outubro a dezembro, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, até atingir 19.0 ug.m<sup>-3</sup>. Nos meses do ano seguinte, de janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir os menores níveis de concentração  $PM_{10}$  no mês de maio, respondendo basicamente à emissão feita por indústrias e veículos automotores, antes de iniciar o novo ciclo. Jaú, o sexto maior produtor do estado, com 46.684,00 ha cultivados (CANASAT, 2009), até 2006 queimava aproximadamente 92% de sua área colhida (Aguiar et al., 2009). Porém, as emissões de aerossóis na atmosfera no estado de São Paulo, oriundos das queimadas de cana, seguem tendência de redução desde 2007, pois com o intuito de acelerar o processo de diminuição dessa queima, a Secretaria de Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo e a União da Agroindústria de Cana-deaçúcar de São Paulo (UNICA) assinaram protocolo no ano citado, onde se determina que os produtores e indústrias do estado que aderirem a este deverão eliminar gradativamente a prática da queimada na colheita da cana até 2017, prazo final para a erradicação. Em 2010, o percentual de cana não queimada deverá ser aumentando para 70% em áreas passiveis de mecanização (declividade superior a 12%), e 30% em áreas não passiveis.

#### 2.2. Instrumentação e obtenção dos dados

A base de dados de irradiâncias global na horizontal  $I_G$  e direta na incidência  $I_d$  foram medidas, respectivamente, por um piranômetro Eppley PSP e por um pireliômetro Eppley NIP acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley instalados na Estação Radiométrica de Botucatu. Os dados medidos foram registrados por um sistema automático de aquisição de dados CR23X e armazenados diariamente no módulo de memória SM192, ambos da Campbell Scientific-Inc., no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2005, operando continuamente. Os dados armazenados no módulo de memória são transferidos diariamente para um microcomputador através de uma interface SC532 e do software PC208w da Campbell Scientific-Inc..

A base de dados de precipitação pluviométrica diária foi registrada por um pluviógrafo Ota Keiki Seisakusho instalado na Estação Climatológica de Botucatu/SP, no período de janeiro de 1996 a dezembro de 2005, operando continuamente. Ambas as estações citadas anteriormente estão situadas na Faculdade de Ciências Agronômicas/UNESP/Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°W, altitude 786 m nmm).

Os dados de profundidade óptica de aerossóis AOD foram os medidos pelo satélite TERRA, no período de janeiro de 2000 a dezembro de 2005, através do instrumento MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). O MODIS é um radiômetro espectral passivo que possui uma largura de abertura de 2330 km, sendo capaz de monitorar quase todo o globo em 1 dia, com 36 grandezas espectrais discretas medidas (ou bandas) entre 0,4 e 14,5  $\mu$ m. Os dados utilizados aqui correspondem a banda 4, de 0,55  $\mu$ m, disponibilizados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) em <u>http://terra.nasa.gov</u>. Este satélite entrou em atividade em dezembro de 1999 e faz parte do programa EOS (*Earth Observing System*) da NASA e possui órbita descendente, com horário de passagem sobre o Equador em torno das 10h30min, numa altitude de aproximadamente 700 km.

#### 2.3. Avaliação dos dados e cálculos

Os dados de irradiância global na horizontal e da direta na incidência, média de 5 minutos, foram processados e "filtrados" com o uso do software ORIGIN 6.0, ou seja, foram submetidos a um controle de qualidade, onde foram verificados individualmente para a identificação de possíveis erros de coleta, de armazenamento ou de transferência. Os dados negativos e os zeros absolutos foram excluídos, para não comprometer a série de dados de 10 anos e garantir a confiabilidade das medidas. No caso da irradiância solar direta na incidência, a base de dados foi novamente filtrada para eliminar valores inferiores a 120 W/m<sup>2</sup>. As irradiações global H<sub>G</sub> e no topo da atmosfera H<sub>o</sub>, em MJ/m<sup>2</sup>, utilizadas no calculo do índice de claridade K<sub>T</sub>, foram calculadas a partir da integração da irradiância global I<sub>G</sub> e da no topo da atmosfera I<sub>o</sub>, na hora e no dia. O índice de nebulosidade, o qual refere-se à fração do céu coberta pelas nuvens quando observado de uma localização em particular, foi calculado pela Equação 1:

$$f = 1 - \frac{n}{N} \tag{1}$$

onde: n representa o número de horas de brilho solar e N o fotoperíodo, ambos expressos em horas. O número de horas de brilho solar foi determinado a partir da base de dados de irradiância solar direta na incidência, levando em consideração o critério citado por Oliviéri (1998), o qual considera como horas de brilho solar o somatório dos segundos do dia em que a irradiância direta na incidência é maior que 120 W/m<sup>2</sup>.

Para a determinação das freqüências das condições de cobertura do céu em Botucatu, classificaram-se as horas do fotoperíodo e os dias da base total de dados conforme o critério usado para classificar a condição de cobertura do céu descrito por Escobedo et al. (2009) para Botucatu, ilustrado na Fig. 2 e descrito abaixo:



**Figura 2.** Evoluções das radiações médias de 5 minutos da global, difusa e direta na horizontal médias em função de intervalos infinitesimais de K<sub>T</sub>. Fonte: Escobedo et al. (2009).

• Cobertura de céu I, nebuloso:  $K_T \le 0.35$ , a radiação direta é praticamente igual a zero, ou seja, a parcela global é equivalente a difusa;

• Cobertura de céu II, parcialmente nebuloso com dominância para o difuso:  $0.35 < K_T \le 0.55$ , a radiação global é composta de uma maior parcela da radiação difusa que decresce, variando gradativamente de 249,89 a 209,02 W/m<sup>2</sup>, até igualar-se a parcela direta, o quê ocorre em torno de 200W/m<sup>2</sup>;

• Cobertura de céu III, parcialmente nebuloso com dominância para o claro:  $0,55 < K_T \le 0,65$ , a radiação global é composta de uma maior parcela da radiação direta, que aumenta gradativamente enquanto a difusa diminui variando de 209,02 a 158,30 W/m<sup>2</sup>;

• Cobertura de céu IV, claro:  $K_T > 0.65$ , a radiação global possui a maior parcela da radiação direta dentre os quatro intervalos, sendo maior que 359,75 W/m<sup>2</sup>, e mínima de difusa.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1. Distribuição das freqüências mensais diárias

A Fig. 3 mostra os valores médios mensais de nebulosidade, precipitação acumulada e da profundidade ótica de aerossóis.



Figura 3. a) Nebulosidade média mensal diária, período de 1996 à 2005; b) precipitação acumulada média mensal, período de 1996 a 2005; c) Profundidade óptica de aerossóis (AOD) média mensal diária, período de 2000 a 2005.

Os valores de nebulosidade média mensal diária, Fig. 3a, decrescem dos meses de janeiro (0,61) e dezembro (0,55), para os meses mais centrais do ano, julho (0,41) e agosto (0,40). As exceções ocorrem nos meses de maio e junho, nos quais a temperatura e umidade relativa decrescem, enquanto a nebulosidade aumenta em maio com relação a abril, e em junho comparado a maio. Essa singularidade existe por conta de 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, maio e junho.

A evolução anual da precipitação acompanhou a evolução da nebulosidade (Fig. 3b). É constituída de dois períodos distintos: chuvoso e seco, onde o limite entre os períodos é o valor da precipitação acumulada de 100 mm, aproximadamente. O valor de precipitação acumulada é elevado no mês de janeiro (306,38 mm) e menor em julho (32,93 mm). No período chuvoso, de outubro a março (estações primavera e verão) a precipitação é de natureza convectiva, originada do processo de convecção livre. A chuva convectiva é do tipo localizado com grande variabilidade espacial, a intensidade é moderada a forte dependendo do desenvolvimento vertical das nuvens, a predominância de ocorrência é durante a tarde ou inicio de noite e a duração é curta a média (de minutos a horas). No período seco, de abril a setembro (estações 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 é generalizada na região, a intensidade é de fraca a moderada dependendo do tipo de frente fria, e a duração é de media a longa (horas ou dias), dependendo da velocidade de deslocamento da frente.

A evolução anual da média diária da profundidade ótica de aerossóis AOD, Fig. 3c, do período de 2000 a 2005, mostra que a partir do inicio das queimadas de cana em junho/julho, a quantidade de aerossóis na atmosfera aumenta consideravelmente no período de agosto  $(0,14 \pm 0,05)$  a outubro  $(0,22 \pm 0,1)$ , com valor máximo em setembro  $(0,29 \pm 0,13)$ . A concentração começa a decrescer, ao final do ciclo de colheita, até atingir o menor nível no mês de maio  $(0,08 \pm 0,03)$ , respondendo basicamente à emissão feita por indústrias e veículos automotores, antes de iniciar o novo ciclo.

A Fig. 4 apresenta a distribuição de freqüência anual média mensal diária para as quatro condições de céu.



Figura 4. Distribuição da freqüência anual das médias mensais diárias, período de 1996 a 2005: a) nebuloso; b) parcialmente nebuloso com dominância para o difuso; c) parcialmente nebuloso com dominância para o claro e d) Claro.

Os valores de freqüência da cobertura de céu nebuloso, Fig. 4a, são maiores no período chuvoso (de outubro a fevereiro), onde a concentração de nuvens é mais elevada no ano. Neste período, a precipitação convectiva da época e a nebulosidade são responsáveis pelos resultados. Ao contrario, a menor freqüência ocorreu no período seco (abril a agosto), onde a concentração de nuvens e vapor de água é a menor do ano; com exceções aos meses de maio e junho, os

quais são influenciados pelo aumento da nebulosidade resultante das entradas de frentes frias. O mês de janeiro apresentou o maior valor de freqüência média (29,78%  $\pm$  12,82) e julho o menor (9,50%  $\pm$  5,43); Para parcialmente nebuloso com dominância para o difuso, Fig. 4b, a evolução anual da freqüência acompanhou a da precipitação: aumentou gradativamente nos meses do período chuvoso e diminuiu nos meses mais secos. Janeiro apresentou o maior valor de freqüência média (41,23%  $\pm$  7,76) e agosto o menor (13,57%  $\pm$  7,08%). Para parcialmente nebuloso com dominância para o claro, Fig. 4c, o mês de julho apresentou o maior valor de freqüência média (30,60%  $\pm$  12,80) e janeiro o menor (21,29%  $\pm$  10,59).

A evolução anual da freqüência da cobertura de céu claro, Fig. 4d, é inversa a da nebulosidade e da precipitação, sendo maior no período seco, onde são baixas a concentrações da nebulosidade e de vapor de água e maior a concentração de aerossóis. O mês de agosto apresentou a maior freqüência média (53,80%  $\pm$  20,20) e janeiro a menor (7,70%  $\pm$  5,08). O mês abril apresentou uma das maiores freqüências médias de céu claro na série de 10 anos (44,36%  $\pm$  19,72). É provável que o mês de abril, sendo um mês posterior ao período chuvoso e precedente ao período das entradas de frentes frias, seja um mês com condição transitória de céu claro, de baixos valores de nebulosidade e precipitação, antes do inverno.

#### 3.2. Distribuição de freqüência diurna média horária mensal

A Fig. 5 mostra a evolução diurna da freqüência média mensal horária da condição de céu nebuloso, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005. A evolução diurna da freqüência em todos os meses possui um comportamento similar, onde os valores decrescem nos intervalos horários do inicio e fim do dia para os intervalos horários no meio do dia. Ou seja, a evolução diurna da freqüência acompanha à evolução diurna do ângulo de elevação solar, ou inversamente, à evolução diurna do ângulo zenital. Essa característica nos permite concluir que o fator atmosférico responsável por essa distribuição de freqüência é a massa ótica, que decresce no sentido dos intervalos horários do inicio e final do dia para os intervalos horários no meio do dia. Quanto maior a massa óptica, maior é a probabilidade de a radiação global ser absorvida ou espalhada por nuvens, vapor de água e aerossóis, reduzindo os valores de K<sub>T</sub>.



Figura 5. Freqüência relativa média mensal horária da condição de céu nebuloso, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005.

Os valores de freqüência da cobertura de céu nebuloso são maiores nos meses que compõem o período chuvoso (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro), nos quais a concentração de nuvens e vapor de água é elevada no ano. Por outro lado, é menor no período seco, nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto, setembro, onde predomina a condição de céu claro e baixas concentrações de vapor de água na atmosfera. No geral, em relação à evolução diurna, o mês de janeiro apresentou os maiores valores de freqüência e julho os menores, ao longo do fotoperiodo.

A freqüência da cobertura de céu parcialmente nebuloso com dominância para o céu difuso, Fig. 6, é também maior nos meses correspondentes ao período chuvoso, e menor nos meses do período seco. Similarmente a condição de céu nebuloso, na evolução diurna, o mês de janeiro apresentou as maiores os maiores valores de, e julho as menores.



Figura 6. Freqüência relativa mensal horária da condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o difuso, no período de 1996 a 2005.

As freqüências da cobertura de céu parcialmente nebuloso com dominância para difuso apresentam, na maioria dos meses, os menores valores de freqüência no primeiro e último intervalo horário, no inicio e final do dia, respectivamente, e os maiores no sentido do segundo e penúltimo intervalo horário para os intervalos horários no meio do dia. A partir destes últimos horários, a freqüência decresce de forma similar a condição de céu nebuloso, onde atinge valores mínimos nos horários do meio do dia. Essa anomalia esta associada aos baixos valores de K<sub>T</sub>, conforme Fig. 7, no primeiro e último intervalo horário, que são quase que inteiramente de condição nebulosa que atingiram níveis de 60% a 90% dependendo do mês.



Figura 7. Evolução diurna do K<sub>T</sub> médio anual horário no período de 1996 a 2005.

Basicamente a fração restante dos 100% pertence as demais condições tendo percentuais na seqüência: condições de céu parcialmente nebuloso com dominância para o difuso, condições de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro e claro. Dentro da evolução diurna das freqüências, o mês de dezembro apresentou os maiores valores de freqüência e agosto os menores, ao longo do fotoperiodo.

A Fig. 8 mostra a distribuição de freqüência no intervalo correspondente ao da condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro.



Figura 8. Freqüência relativa média mensal horária da condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro, de janeiro a dezembro no período de 1996 a 2005.

Para a condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro, a evolução diurna da freqüência no geral é maior no período chuvoso que no período seco. Nesta condição, devido aos efeitos dos baixos valores de  $K_T$  nestes dois intervalos horários, além da primeira e última, os valores da freqüência, na segunda e penúltima hora do dia, também são baixos. Conseqüentemente, os intervalos horários de maior freqüência são a partir das 8:0 horas e das 16:0 horas, ambos no terceiro intervalo horário, e crescem ou decrescem no sentido do inicio e fim, para o meio do dia dependendo do período ser seco ou úmido. No período úmido (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro), com uma maior nebulosidade e elevadas concentrações de vapor de água, os valores de freqüência são mais elevados e mais ou menos uniformes. No entanto, no período seco (abril, maio, junho, julho, agosto e setembro), os valores de freqüência decrescem a partir das 8 horas e das 16 horas para os intervalos horários próximos ao meio dia. Na evolução diurna, o mês de dezembro apresentou os maiores valores de freqüência e agosto os menores.

A Fig. 9 mostra a distribuição de freqüência no intervalo correspondente ao da condição de céu claro. A evolução diurna da freqüência apresentou uma distribuição característica comum em todos os meses: os valores de freqüência aumentam do inicio do dia como uma função parabólica, até passar por um valor máximo nos intervalos horário no meio do dia, e decrescendo posteriormente até o ultimo intervalo horário no fim do dia.



Figura 9. Freqüência de dias com condição de céu claro, de janeiro a dezembro, no período de 1996 a 2005.

Inversamente à distribuição de freqüência para a cobertura de céu nebuloso, as freqüências para céu claro, para cada mês, são maior nos meses do período seco e menores no período úmido, conseqüência da baixa nebulosidade no período seco. Observa-se também que os valores de freqüência após o meio do dia, no período úmido, decrescem de maneira acentuada se comparado ao período seco, como efeito da ocorrência de chuvas convectivas, predominantes no período da tarde ou início da noite e que são precedidas de alta nebulosidade e concentração de vapor de água na atmosfera.

## 4. CONCLUSÕES

A freqüência da cobertura de céu nebuloso é maior no período chuvoso (de outubro a fevereiro), onde a concentração de nuvens é mais elevada no ano, e menor no período seco (de abril a agosto), onde a concentração de nuvens e vapor de água é a menor do ano. O mês de janeiro apresentou a maior freqüência média (29,78%  $\pm$  12,82) e julho a menor (9,50%  $\pm$  5,43). Dentro da evolução diurna, as freqüências em todos os meses decrescem dos intervalos horários do inicio e fim do dia para os intervalos horários no meio do dia, onde o fator atmosférico responsável é a massa ótica, que decresce no sentido da evolução da freqüência.

A freqüência da cobertura de céu parcialmente nebuloso com dominância para o difuso é maior nos meses do período chuvoso e menores nos meses secos. O mês de Janeiro possui o maior valor de freqüência média (41,23%  $\pm$  7,76) e agosto o menor (13,57%  $\pm$  7,08). Dentro da evolução diurna, na maioria dos meses, os menores valores de freqüência ocorrem no primeiro e último intervalo horário, ou seja, no inicio e final do dia respectivamente, e os maiores no sentido do segundo e penúltimo intervalo horário para os intervalos horários no meio do dia.

A freqüência da condição de céu parcialmente nebuloso com dominância para o claro, na evolução anual, é maior em julho  $(30,60\% \pm 12,80)$  e menor em janeiro  $(21,29\% \pm 10,59)$ . Na evolução diurna, os intervalos horários de maior freqüência são a partir das 8:0 horas e das 16:0 horas, ambos no terceiro intervalo horário, e crescem ou decrescem no sentido do inicio e fim para o meio do dia, dependendo do período ser seco ou úmido.

A freqüência da cobertura de céu claro é maior no período seco e menor no período úmido, onde é elevada a concentrações da nebulosidade e o vapor de água e menos a concentração de aerossóis. O mês de agosto apresentou a maior freqüência média (53,80%  $\pm$  20,20) e janeiro a menor (7,70%  $\pm$  5,08). Dentro da evolução diurna, a freqüência apresenta uma distribuição característica comum em todos os meses, onde aumenta como uma função parabólica com valor máximo no intervalo horário do meio do dia, acompanhando a evolução da massa óptica ao longo do fotoperiodo.

## 5. REFERÊNCIAS

- Aguiar, D. A. et al.. Imagens de sensoriamento remoto no monitoramento da colheita da cana-de-açúcar. **Eng. Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 3, p.440-451, 2009.
- Angstron, A. Solar and terrestrial radiation. Q. J. R. Meteorol. Soc., v.50, p.121-5, 1924.
- CANASAT. Área de Cana Safra e Reforma na Região Centro-Sul. Disponível em
- <a>http://150.163.3.3/canasat/tabelas.php>. Acesso em 18 janeiro de 2009.</a>
- Che, H. Z. et al. Analysis of sky conditions using 40 year records of solar radiation data in china. **Theory and Applied Climatology**. v. 89, p. 83-94, 2007.
- Codato, G., et al.. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in Southeast Brazil. **Theory and Appl. Climat.**, v. 93, p. 57-73; 2008.
- Escobedo, J; Gomes, E. N.; Oliveira, A; Soares, J. 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, 2009.
- IBGE. Censo dos municípios 2007. Disponível em <a href="http://www.ibge.gov.br/cidadesat/">http://www.ibge.gov.br/cidadesat/</a>. Acesso em 30 julho de 2009. Iqbal, M. An introduction to solar radiation. London: Academic Press., 1983. 390 p.
- Kinsell, L. C. Solar and terrestrial radiation : methods and measurements. New York: Publisher Academic Press, 1975. Kudish, A. Ianetz . Analysis of daily clearness index, global and beam radiation for beer sheva, israel: partition according to day type and statistical analysis. Energy Convers. Mgmt, v. 37, n. 4, p. 405-416, 1996.
- Li, D. H. W; Lam, J. C. A study of atmospheric turbidity for Hong Kong. **Building and Environment**, v. 36, n. 4, p. 435-450, 2001.
- 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.
- Molineaux, B.; Ineichen, P.. Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity improving model performance. **Solar Energy**, v. 55, n. 2, p 125-137, 1995.
- Mosalam Shaltout, et al.. Total suspended particles and solar radation over Cairo and Aswan. **Renewable Energy**, v. 23, p. 605-619, 2001.
- National Aeronautics and Space Administration NASA. MODIS Atmosphere Parameters Subset Statistics (MAPSS). Disponível em: < http://terra.nasa.gov >. Acesso em: 13 de fevereiro de 2010.
- Ogunjobi, K. O. et al. E.Analysis of sky conditions using solar radiation data at Kwangju and Seoul, South Korea and Ile-Ife, Nigeria. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 72, p. 265-272, 2002.

Oliviéri, J. C.. Sunshine duration measurement using a pyranometer. World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods report nº 70, WMO Tech. Doc, n. 877, 385 p., 1998.

Udo, S. O. Sky conditions at Ilorin as characterized by clearness index and relative sunshine. Solar Energy. v. 69, n. 1, p. 45-53, 2000.

### DISTRIBUTION OF FREQUENCY OF SKY CONDITIONS IN BOTUCATU/SP

*Abstract.* This paper presents an analysis of the variation of the sky conditions in Botucatu/SP/Brazil, classified based on the clearness index  $K_T$ , the decade from 1995 to 2006. We determined the daily monthly average frequency and hourly monthly average frequency of the sky conditions: I - cloudy ( $K_T < 0.35$ ), II - partly cloudy with dominance for the diffuse (0.35  $< K_T \le 0.55$ ), III - partly cloudy with dominance for the clear (0.55  $< K_T \le 0.65$ ) and IV - clear ( $K_T > 0.65$ ). The frequency of sky conditions I and II is higher in the rainy season (October-February), where the concentration of clouds and water vapor are highest in years, and lowest in the dry season (April-August). January present the highest value of average frequency (29.78% ± 12.82) and July the lowest (9.50% ± 5.43), where the sky condition IV is predominant. To sky condition II, January showed the highest value of average frequency (30.60% ± 12.80) and January the lowest (21.29% ± 10.59). To sky condition IV, August showed the highest average frequency (53.80% ± 20.20) and January the lowest (7.70% ± 5.08). Within the diurnal evolution, the frequencies of the sky condition I, in all months, decreasing the time interval from the beginning and end of the day for time slots in the middle of the day, following in reverse the trend of mass daytime optics, whereas to sky condition IV, it increases as a parabolic function from the beginning to the end of the photoperiod.

Key words: Solar radiation, Sky conditions, Clearness index, Cloudiness.