

SÉRIES DIURNA E ANUAL DA RADIAÇÃO DIRETA NA INCIDÊNCIA NORMAL EM BOTUCATU, PERÍODO DE 1996 A 2005

Eduardo Nardini Gomes – engomes@fca.unesp.br

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Departamento de Recursos Naturais/Ciências Ambientais – FCA/UNESP/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 é apresentado o estudo das evoluções diurna e a anual da radiação direta na incidência normal para uma base de dados do período de 1996 a 2006 em Botucatu. Com a evolução diurna obteve-se as séries médias horárias dos anos e dos meses, e com a evolução anual a série das médias mensais dos dias. As séries diurnas para os dez anos apresentaram energia média horária máxima entre $2,20195\text{MJm}^{-2}$ e $1,77088\text{MJm}^{-2}$, com média total de $1,97521\text{MJm}^{-2}$. A série média horária anual, ou modelo experimental anual, gerou uma equação polinomial de quarta ordem, com elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99867$), e a validação mostrou que os modelos, experimental e polinomial, se ajustaram às medidas de 2006 ($d=0,9980$), superestimando ($MBE=1,0\%$) com baixo nível de espalhamento ($RMSE=3,7\%$). No entanto, para estimativas mensais, o modelo anual apresentou limitações sazonais devido às variações climáticas, sendo mais preciso no mês de agosto que em janeiro. As séries diurnas das médias horárias mensais geraram 12 equações de quarta ordem, com coeficientes de determinação superiores a 0,9812. Na validação, o modelo mensal superestimou em 1,2% em novembro a 35,0% em fevereiro, e subestimou de -17,8% em maio a -4,3% em agosto; o indicativo RMSE variou de 3,9% (setembro) a 34,0% (fevereiro), e o indicativo d de Willmott variou de $d=0,9980$ (setembro) a $d=0,780$ (fevereiro). A série anual da radiação direta média mensal diária apresentou valor mínimo de $11,49624\text{MJm}^{-2}$ em janeiro e máximo de $18,89140\text{MJm}^{-2}$ em agosto e gerou uma equação polinomial com coeficiente de determinação $R^2=0,80291$.

Palavras-chave: radiação solar, radiação direta, modelos de estimativa de radiação solar, medida de radiação.

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar direta na incidência normal (0,285 a $4,0\mu\text{m}$) é uma fração da radiação solar global que atinge a superfície terrestre e seu conhecimento por meio de séries temporais ou por modelos de estimativa (estatístico ou paramétrico) é de fundamental importância para elaboração de projetos que estão relacionados com conversão de energia radiante em energia elétrica e térmica por meio concentradores e coletores solares, e nas áreas da Engenharia Térmica, Agronomia, Fisiologia Vegetal e Arquitetura, entre outras.

As séries temporais permitem conhecer a disponibilidade energética nas horas do dia e nos meses do ano, sem necessidade de outros instrumentos de medida. A desvantagem deste método é a obtenção das séries temporais, pois exige que medida da radiação direta na incidência normal seja realizada nos locais por vários anos, o que representa uma desvantagem, devido às dificuldades de obtenção e manutenção do Pireliômetro com sistema de rastreamento solar, instrumento que mede a radiação direta na incidência normal.

Já os modelos de estimativa, estatístico ou paramétrico, representam alternativas mais interessantes e econômicas, pois podem ser utilizados em projetos de simulação da radiação solar em outros locais com características climáticas similares, usando medida na entrada do modelo, outra variável, ou outro tipo de radiação, que é mais comumente monitorada em postos meteorológicos. Os modelos de estimativa estatísticos são mais simples que os paramétricos, pois a radiação ou a variável meteorológica (normalmente a radiação global ou número de horas de brilho solar) é medida de rotina em redes meteorológicas distribuída nos países que fazem previsão de tempo. Já os modelos paramétricos necessitam de informações de parâmetros atmosféricos de menor disponibilidade na rede solarimétrica mundial, como é o caso da concentração de ozônio, aerossóis, gases, etc.

Informações sobre radiação direta na incidência normal, na forma de séries temporais ou equações de estimativas em função da radiação global, são limitadas no Brasil (Plana-Fatori, 1989; Plana-Fatori e Rozante, 1997). Não existe ainda um banco de dados desta radiação em nível nacional. A causa está no custo do equipamento que é importado e caro, e principalmente da manutenção do pireliômetro com rastreador solar, que exige uma atenção permanente de um técnico especializado.

Com o propósito de se conhecer melhor os níveis de energia de radiação solar direta na incidência normal, no dia e no ano, bem como suas dependências sazonais, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP/Brasil monitora essa radiação desde o ano 1996. A base de dados existente ainda não é longa o bastante para geração de séries normais, no entanto é suficiente, em função do número de horas e dias, para geração de séries temporais mais curtas, que indicam as tendências no dia e ano, como mostram os primeiros resultados nos trabalhos já desenvolvidos por Gomes et al. (2006).

Assim, objetivo do trabalho foi dar continuidade no estudo com a radiação direta na incidência normal, desenvolvendo primeiro a série diurna das médias horárias do ano e dos meses, bem como a série anual das médias mensais dos dias, analisando os efeitos sazonais das variações climáticas locais. A partir desses resultados, propor as equações de estimativa polinomial e a validá-las para uma base de dados independente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Clima.

A Estação de Radiometria Solar está inserida em ambiente rural na Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de Botucatu (latitude 22,85°S, longitude 48,45°W e altitude 786m), e monitora de rotina a radiação solar direta na incidência normal desde 1995.

A cidade com 100mil habitantes não possui indústria poluidora, porém no período da seca (maio, abril, junho, julho, agosto e setembro) pode apresentar uma atmosfera sujeita a material particulado proveniente das queimadas da cana-de-açúcar, e das usinas que produzem o álcool e açúcar, localizadas em um raio de 100 Km da cidade.

O clima local é classificado como Cwa (critérios de KÖPPEN), temperado quente (mesotérmico), o verão é quente e úmido, e o inverno é seco. O dia mais longo (solstício de verão) tem 13,4 horas em dezembro, e o mais curto (solstício de inverno) tem 10,6 horas em junho. Os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em julho e fevereiro com totais de 251,4h e 177,4h, respectivamente. Os meses de maior e menor nebulosidade ocorrem em janeiro e agosto com percentuais 60,7% e 27,0%, respectivamente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro, com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm. Os meses de fevereiro e julho são respectivamente, o mais quente e frio do ano, com temperaturas médias de 23,2C⁰ e 17,1C⁰, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80%, respectivamente.

2.2. Instrumentação

A base de dados das radiações solar direta na incidência normal utilizada compreende os anos de 1996 a 2006. A irradiância direta na incidência normal (I_b) foi monitorada por um pireliômetro Eppley NIP, acoplado a um rastreador solar ST3 da Eppley. As características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao co-seno e a temperatura dos detectores da radiação direta estão apresentados na tab. 1:

Tabela 1. Características operacionais referentes a fator de calibração, intervalo espectral, tempo de resposta, linearidade, resposta ao cosseno e a temperatura dos detectores da radiação direta.

Radiação	Direta
Sensor - Marca	Pireliômetro - Eppley
Fator de Calibração	7,59 μ V/Wm ⁻²
Range Espectral	295-2800nm
Tempo de resposta	1s
Linearidade	$\pm 0,5\%$ (0 a 1400 W/m ²)
Cosseno	--
Resposta à temperatura	$\pm 1\%$ de -20°C a 40°C

Na aquisição dos dados foi utilizado um Datalogger da Campbell CR23X, operando na frequência de 1 Hz, armazenando médias instantâneas de 5 minutos (médias de 300 leituras instantâneas).

O pireliômetro NIP passa anualmente por uma aferição tendo como referencia o pireliômetro absoluto modelo HF também fabricado pela Eppley, seguindo o método comparativo estabelecido pela Organização Mundial de Meteorologia (Fröhlich & London, 1986).

Os dados de radiações passam por um controle de qualidade onde são eliminados os valores espúrios, e em uma segunda etapa, os dados são processados por programas desenvolvidos especificamente para o cálculo das radiações horárias, diárias e mensais.

2.4- Indicativos Estatísticos

Os indicativos estatísticos *MBE* (Mean Bias Error), *RMSE* (Root Mean Square Error), e “d” de WILLMOTT (1981) foram utilizados na avaliação da performance das equações de estimativa horária e diária.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N}$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{N} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|P_i| + |O_i|)^2}$$

Onde: P_i representa os valores estimados, O_i os valores medidos, N o número de observações, $|P_i|$ o valor absoluto da diferença $P_i - \bar{O}$, onde \bar{O} representa a média dos valores medidos, e $|O_i|$ representa o valor absoluto da diferença $O_i - \bar{O}$.

O indicativo MBE representa o desvio das médias e fornece informações quanto ao desempenho do modelo. Valores negativos de MBE indicam subestimativa do modelo testado, e vice-versa. Segundo Stone (1993), quanto menor o valor absoluto de MBE , melhor é o desempenho do modelo testado. O $RMSE$ é a raiz quadrada do erro quadrático médio e informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo. Em geral, quanto menores os valores obtidos para $RMSE$, melhor desempenho do modelo. O índice de ajustamento “d” variando de 0 a 1 representa o total desajustamento e ajustamento entre a estimativa e a medida (Willmott 1981). A vantagem do indicativo “d” é que descreve as variações proporcionais de duas variáveis, fazendo distinção entre tipo e magnitude de possíveis covariâncias, diferentemente dos coeficientes de correlação (r) e determinação (r^2) que não fazem distinção.

A utilização dos indicativos estatísticos MBE , $RMSE$ e índice de ajustamento “d”, em conjunto é a alternativa adequada para validação de modelos estatísticos porque permite análise simultânea do desvio da média, identificando a ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento do modelo em relação as medidas.

3. RESULTADOS

3.1. Evolução diurna da radiação direta média horária.

A tab. 2 apresenta as evoluções médias horárias da radiação direta na incidência normal no período de 1996 a 2006 em Botucatu. Com a base de dados de 1996 a 2005 obteve-se a série dos 10 anos ou modelo experimental.

Tabela 2. Evoluções das médias horárias da radiação direta na incidência normal ($MJ m^{-2}$) no período de 1996 a 2006.

Hora Local	Ano										Média	Desvio	Ano 2006
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005			
5,5	0,03601	0,05073	0,05886	0,05631	0,03383	0,02991	0,02191	0,04074	0,09130	0,06435	0,04840	0,020386	0,02513
6,5	0,24484	0,29946	0,38153	0,35148	0,25702	0,25382	0,27116	0,47722	0,39265	0,34687	0,32761	0,075806	0,38497
7,5	1,03255	1,00482	1,03442	1,08570	0,95714	0,97525	0,96879	1,26274	0,97477	0,91271	1,02089	0,097730	1,06561
8,5	1,56227	1,53820	1,54098	1,58612	1,52715	1,61404	1,56837	1,72087	1,36136	1,36741	1,53868	0,107225	1,54188
9,5	1,96307	1,76796	1,65699	1,86045	1,85719	1,83007	1,83724	1,98749	1,61146	1,64815	1,80201	0,129531	1,74911
10,5	2,00742	1,96851	1,78431	2,03021	1,87543	1,88130	1,99591	2,19021	1,77125	1,74663	1,92512	0,139338	1,85954
11,5	2,02514	2,03261	1,83378	2,10688	1,89410	1,96030	2,09916	2,20195	1,82726	1,77088	1,97521	0,141556	1,93396
12,5	1,98584	1,98041	1,78881	2,01346	1,89054	1,93201	2,03948	2,19946	1,75667	1,77235	1,93590	0,13875	1,88438
13,5	1,77079	1,84342	1,73523	1,91673	1,87275	1,82872	1,79571	2,04791	1,67201	1,60129	1,80846	0,126186	1,77407
14,5	1,63385	1,80038	1,69734	1,79562	1,64149	1,73352	1,69866	1,93591	1,57499	1,47455	1,69863	0,129203	1,68802
15,5	1,43235	1,57828	1,44185	1,54237	1,36463	1,58551	1,50951	1,70590	1,38888	1,33212	1,48814	0,116965	1,52496
16,5	0,97378	0,91882	0,97778	0,98493	0,89050	0,93229	0,96371	1,32034	1,08275	1,02248	1,00674	0,122659	1,16179
17,5	0,26890	0,40156	0,32766	0,35225	0,29310	0,30289	0,32491	0,51148	0,34738	0,30111	0,34312	0,069782	0,43455
18,5	0,05597	0,05566	0,01170	0,02663	0,01705	0,03714	0,05874	0,06004	0,05900	0,07879	0,04607	0,021768	0,02076
Σ	16,9928	17,2408	16,2712	17,7091	16,3719	16,8968	17,1533	19,6623	15,9117	15,4397	16,9649	0,102635	17,0487

Com a base de 2006 foram realizadas as validações dos modelos experimental e estatísticos, comparando as estimativas com as medidas da radiação direta, que serão apresentadas ao longo do trabalho.

3.1.1. Evolução diurna da radiação direta média horária anual

A fig. 1 mostra a série anual ou a evolução diurna da radiação direta na incidência normal média horária de cada ano (1996 a 2005). A variabilidade entre as curvas médias diurna entre os anos mostra como a cobertura do céu (nuvens, vapor de água e aerossóis) interferem na transmissão da radiação direta na incidência normal em Botucatu.

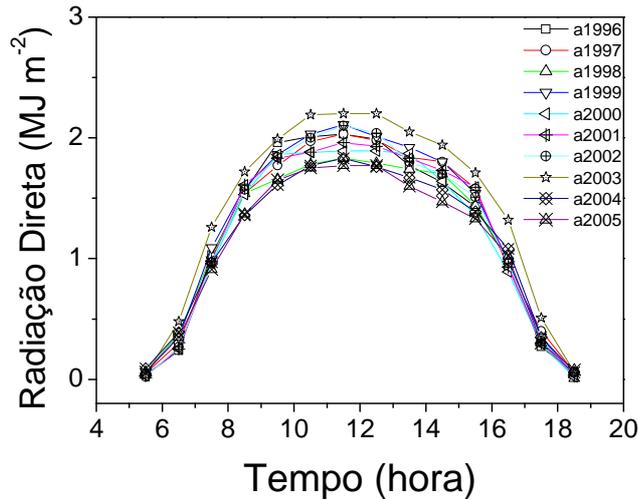


Figura 1. Evolução diurna da radiação direta na incidência normal média horária de cada ano.

A maior área abaixo da curva ocorreu no ano de 2003, sendo o mais energético, enquanto que o ano de menor área, ou de menor energia, foi 2005, com valores de $19,6623\text{MJm}^{-2}$ e $15,4397\text{MJm}^{-2}$, respectivamente. Para os demais anos, as integrações diárias das curvas médias anuais foram de $16,9928\text{MJm}^{-2}$ em 1996; $17,2408\text{MJm}^{-2}$ em 1997; $16,2712\text{MJm}^{-2}$ em 1998, $17,7091\text{MJm}^{-2}$ em 1999, $16,3719\text{MJm}^{-2}$ em 2000, $16,8968\text{MJm}^{-2}$ em 2001; $17,1533\text{MJm}^{-2}$ em 2002; $15,9117\text{MJm}^{-2}$ em 2004 e $17,0487\text{MJm}^{-2}$ em 2006. A integração diária da série foi $16,9649\text{MJm}^{-2}$.

A Fig. 2a mostra a série ou evolução diurna da radiação direta média horária dos 10 anos ou modelo experimental, com os desvios da média para cada intervalo de tempo em horas, e na Fig. 2b os desvios percentuais. A curva apresenta simetria meridional do nascer do sol até o meio dia e do meio dia até o pôr-do-sol. Os valores máximos horários ocorreram no intervalo horário das 11h às 12h e variaram dentro do intervalo de energia $2,20195\text{MJm}^{-2}$ em 2003 a $1,77088\text{MJm}^{-2}$ em 2005 com média de $1,96143\text{MJm}^{-2}$.

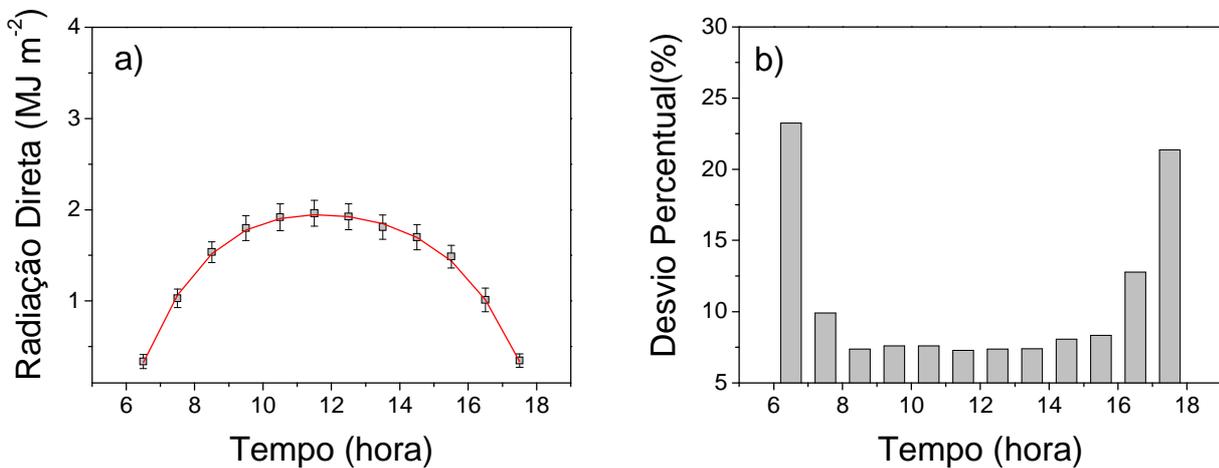


Figura 2. Evolução diurna de 10 anos (com os desvios): (a) Radiação direta média horária e curva polinomial ajustada; (b) Desvios percentuais da radiação direta no tempo em hora.

Os desvios percentuais da radiação direta em função do tempo em hora são maiores no início e final do dia e menos elevados no meio do dia. No início e final do dia atingem valores da ordem de 23,0%, e no meio do dia atingem o menor valor, por volta de 7,3%. Nestes horários, os desvios são muito mais elevados devido às variações da massa ótica, e também por tratar de radiações horárias de baixa energia, as quais sofrem dos efeitos do fotoperíodo e de bordadura experimental, que interferem nas medidas das radiações. Para o intervalo horário principal do dia, das 7h30 às 17h30, onde as energias são mais elevadas, o desvio médio é da ordem de 8,4%, o que demonstra que a variação da radiação direta média horária é relativamente pequena entre os anos.

A função polinomial de quarto grau foi a que melhor se ajustou à evolução experimental média anual da Fig 2a, sendo expressa por:

$$\langle H_b^h \rangle = -20,72163 + 6,8573t - 0,79242t^2 + 0,04181t^3 - 8,5664E - 4t^4 \quad (1)$$

onde t é o tempo em horas, e $\langle H_b^h \rangle$ é expresso em MJm^{-2} .

O elevado coeficiente de determinação, $R^2=0,9990$, mostra que a radiação direta horária média anual está bem correlacionada com o tempo em horas, e que o modelo polinomial de quarto grau esta muito bem ajustado aos dados experimentais.

A Fig. 3 mostra a validação, comparação entre a radiação direta média horária do modelo experimental (medida base de dados de 10 anos), a estimada pela equação (1) e a medida experimental do ano de 2006, em função do tempo em horas, na superfície terrestre.

A comparação entre a radiação direta média horária do modelo experimental (medida base de dados de 10 anos), e a medida experimental do ano de 2006, em função do tempo em horas, mostra uma estimativa com elevado grau de acerto. Em todos os intervalos horários, a média da radiação direta do ano 2006 aproximou-se muito dos valores experimentais, estando dentro do intervalo de variação do modelo experimental de 10 anos.

Os indicativos estatísticos $MBE=2,0\%$, $RMSE=4,8\%$ e $d=0,9960$, obtidos na validação entre a estimativa do modelo polinomial e a medida da radiação direta em 2006, confirmam o bom desempenho da equação (1), que no geral apresentou um elevado índice de ajustamento de 0,9960, subestimando as medidas em menos de 2% e baixo nível de espalhamento 4,8%.

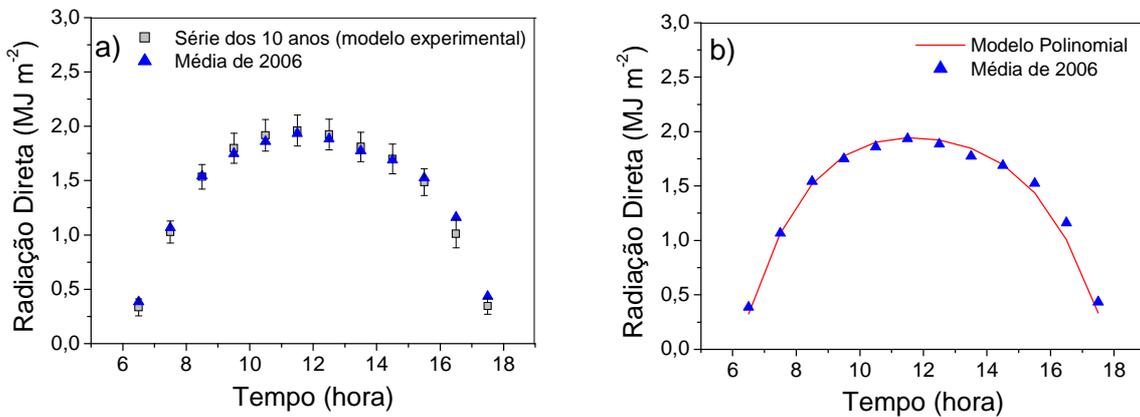


Figura 3. Evoluções diurnas da radiação direta média horária. (a) Série de 10 anos com os desvios e a medida experimental de 2006; (b) Série de 10 anos e modelo de estimativa (equação (1)).

A fig. 4 mostra a evolução da fração solar, onde cada fração horária foi obtida por meio da divisão da radiação direta na incidência normal pela constante solar horária que é igual a $4,921MJm^{-2}$ (Iqbal, 1983). Em se tratando de uma divisão por uma constante, obviamente que a evolução da fração K_b seguiu a mesma tendência da evolução da radiação direta mostrada na Fig. 4.

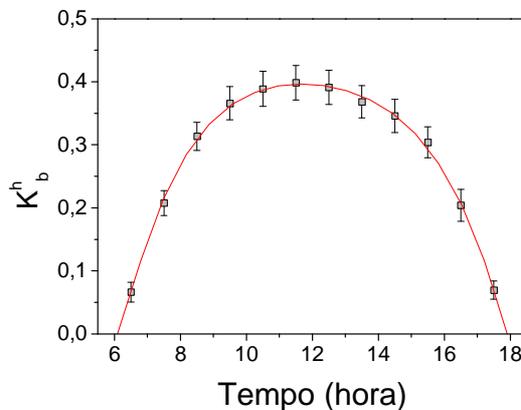


Figura 4. Evolução diurna da fração solar média entre os 10 anos.

A variação da fração horária é do tipo quadrática onde as frações mínimas ocorrem nos intervalos horários inicial e final dia com um valor próximo de $K_b=0,07$ e atinge o valor máximo de $K_b=0,39$ ao meio dia solar. A variação da fração K_b diurna deve-se as variações da massa ótica: quanto menor a massa ótica maior é a fração solar e vice-versa. Os desvios médios horários das frações K_b em função do tempo são iguais aos desvios horários da radiação direta, sendo mais elevados no início e final do dia, e menores no meio do dia.

A Fig. 5 mostra o efeito da sazonalidade é mostrado por meio da comparação entre a o modelo polinomial (Fig. 3a) e os modelos polinomiais mensais de janeiro e de agosto. Os meses de janeiro e agosto foram selecionados para essa análise por tratar dos meses mais úmido e nebuloso contra o mais seco e ensolarado

As evoluções mensais de janeiro e agosto se invertem em relação à evolução média anual, nos intervalos horários entre 6h30 e 7h30 da manhã e no final do dia, às 17h30. Os valores da energia horária da radiação direta em janeiro é maior que a energia média anual, enquanto que no intervalo horário entre 8h30 às 16h30 os valores da energia horária em janeiro é menor que os valores da energia horária média anual.

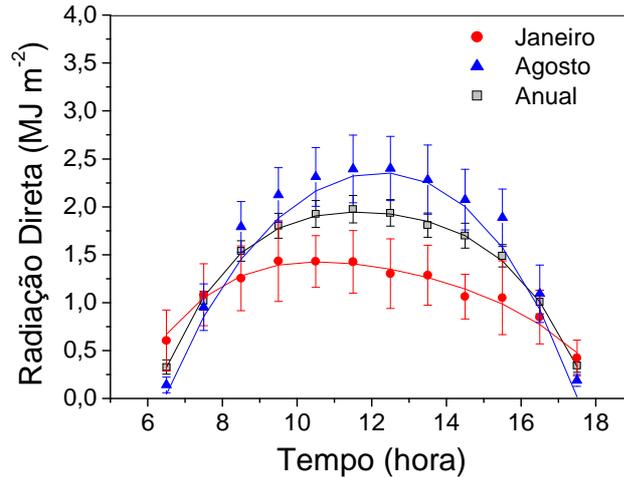


Figura 5. Evolução diurna da radiação direta horária média de janeiro e agosto e da radiação direta horária média dos 10 anos.

Nos intervalos horários no início e final do dia, os valores da energia média mensal de janeiro são superiores ao valor da energia média anual e do mês de agosto, porque o ângulo de elevação solar em janeiro é mais elevado que os ângulos de elevação médios de agosto e o ângulo de elevação médio do ano.

No intervalo horário entre 8h30 às 16h30, os valores da energia média mensal de janeiro são inferiores aos valores da energia média anual e dos valores da energia média de agosto. A absorção da radiação direta por meio de nuvens e vapor de água é mais intensa em janeiro, pois se trata de um dos meses mais úmido e nebuloso do ano, ao contrario de agosto, que é seco e ensolarado.

Em termos integrados, a energia diurna média de janeiro foi de $12,64049\text{MJm}^{-2}$, e a de agosto igual a $19,9251\text{MJm}^{-2}$, enquanto que a evolução média anual foi de $16,45247\text{MJm}^{-2}$. A diferença de energia entre a média horária anual e a média horária mensal de agosto é de 21,1%, enquanto que em de janeiro é de 23,2%. Os resultados mostram que o modelo anual estima melhor a radiação direta no mês de agosto do que em janeiro. Em função dessa variação sazonal, verifica-se a importância do desenvolvimento das evoluções diurnas da radiação direta média mensal horária.

3.1.2 Evolução diurna da radiação direta na incidência normal média horária mensal

A Fig. 6 mostra a evolução diurna da radiação direta horária média mensal (10 anos), em função dos meses e seus respectivos desvios das médias. As evoluções diurnas da radiação direta média mensal horária apresentam variações em função da variabilidade atmosférica diária característica de cada mês.

Os meses de janeiro, dezembro, fevereiro, novembro, março e outubro, período chuvoso, ou das estações do verão e primavera, apresentam maiores concentrações de nuvens e vapor de água, e conseqüentemente, são menores as energias. Por essa razão, as evoluções são mais achatadas ou inferiores que dos meses no período da seca: abril, maio junho, julho, agosto e setembro, ou das estações do outono e inverno, os quais são mais ensolarados e secos.

Na Tab.3 são apresentados os coeficientes das equações polinomiais mensais, coeficientes de determinação e a integração diurna das séries mensais. Os meses de janeiro a março e de setembro a dezembro são menos energéticos enquanto que os meses de abril a agosto são os mais energéticos, comparados à energia média anual.

As maiores diferenças entre as integrações das curvas médias mensais e média anual ocorreram nos meses de abril e janeiro, que foram 18,8% maior e 25,1% menor que a curva média anual, respectivamente. As maiores concordâncias ocorreram nos meses de março, maio, junho e setembro, com diferenças de energia diária inferiores a 1,5%.

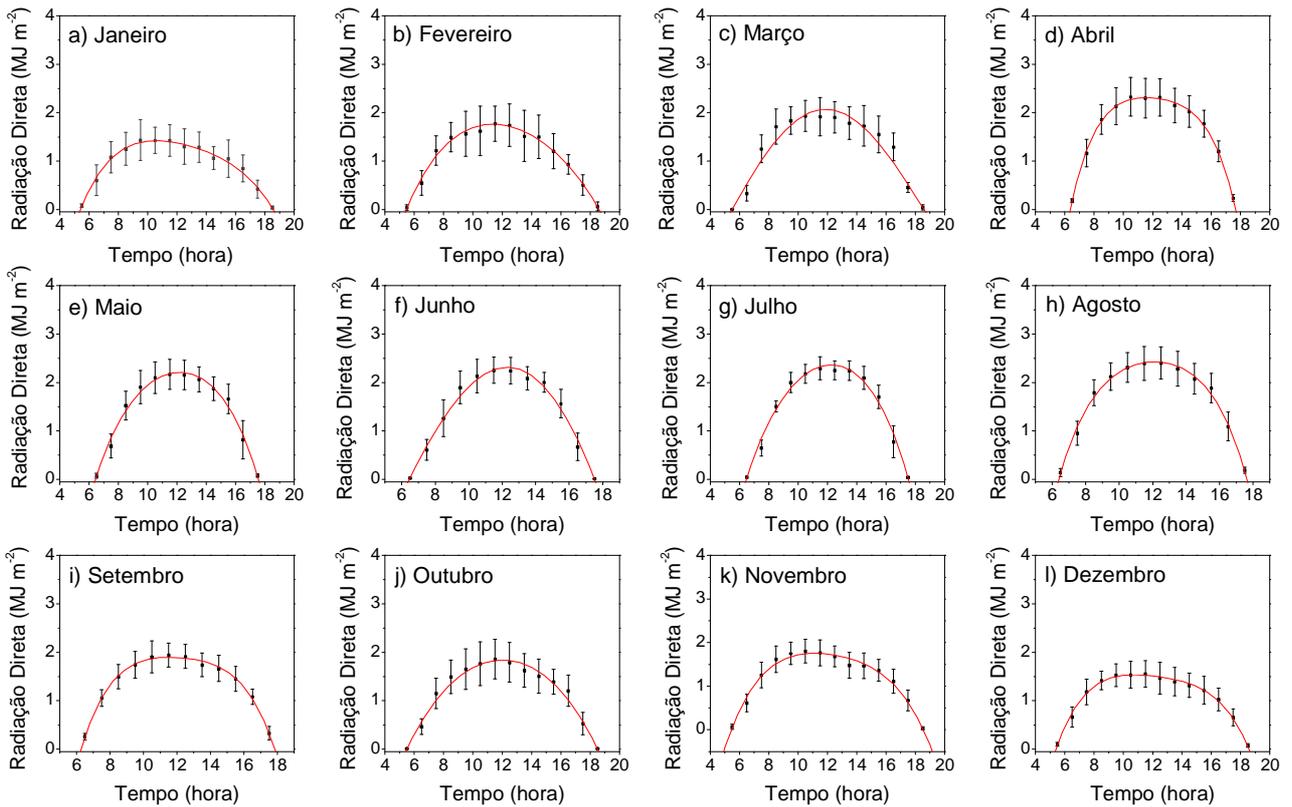


Figura 6 - Evolução diária da radiação direta média mensal horária dos meses de Janeiro a Dezembro e seus respectivos desvios.

Tabela 3. Equações mensais horárias, coeficiente de determinação e integração diária (média mensal)

Mês	Direta = $\sum_{i=0}^4 a_i t^i, (t = 6,5;7,5;8,5;...;17,5)$					R ²	$\int_{t_i=6}^{t_f=18} \langle H_b^h \rangle dt$ (MJ m ⁻²)
	a0	a1	a2	a3	a4		
Janeiro	-9,88962	3,35217	-0,3699	0,01831	-3,5341E-4	0,9973	12,64
Fevereiro	-8,05544	2,45934	-0,22762	0,00971	-1,78967E-4	0,9958	15,15
Março	-2,01806	-0,04722	0,12711	-0,01065	2,29344E-4	0,9812	16,72
Abril	-33,55018	11,31864	-1,35378	0,07298	-0,0015	0,9994	19,96
Mai	-15,83326	4,74477	-0,49392	0,02509	-5,3666E-4	0,9965	17,01
Junho	-4,51593	0,46807	0,07646	-0,00702	1,12582E-4	0,9968	16,80
Julho	-14,71003	4,24755	-0,42156	0,02105	-4,61874E-4	0,9963	17,82
Agosto	-24,54374	7,91645	-0,90256	0,04786	-0,001	0,9975	19,92
Setembro	-25,1516	8,48924	-1,00992	0,05419	-0,00111	0,9986	16,66
Outubro	-6,13231	1,74137	-0,14166	0,00578	-1,21063E-4	0,9927	15,71
Novembro	-12,1291	4,14104	-0,46749	0,02401	-4,82151E-4	0,9955	15,85
Dezembro	-12,45415	4,40617	-0,52116	0,02763	-5,59678E-4	0,9985	14,31

Os valores de R² para os meses de janeiro a dezembro são elevados, excedendo os 0,98 para a maioria dos meses, e mostram que a radiação direta média horária está muito bem correlacionada no tempo em horas. Os ajustes das equações temporais mensais são similares ou da mesma ordem de grandeza do ajuste da equação temporal anual.

A fig. 7 mostra os indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Wilmott obtidos na validação do modelo experimental anual estimando a radiação direta média horária mensal e a validação do modelo polinomial mensal estimando a radiação direta horária mensal, quando comparadas com a medida da radiação direta horária mensal em 2006.

A evolução mensal do indicativo MBE (Fig. 7) mostra que tanto o modelo experimental anual como o modelo mensal superestimaram a medida de 2006 na maioria dos meses do período chuvoso (janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro) e subestimaram a medida de 2006 na maioria dos meses do período seco (abril, maio, junho, julho, agosto e outubro). O desempenho dos dois modelos pode ser observado por meio das barras com cores diferentes, os quais mostram que indicativo estatístico MBE foi melhor para modelo de estimativa mensal, porque foram menores

aos valores obtidos com o modelo de estimativa anual. O indicativo MBE variou de 1,2% em novembro a 35,0% em fevereiro, nas superestimativas do modelo mensal e de 2,5% em novembro a 43,0% em fevereiro, na superestimativa do modelo anual, enquanto que variou de -17,8% em maio a -4,3% em agosto nas subestimativas do modelo mensal e -2,0% em outubro a -20,0% nas subestimativas do modelo anual.

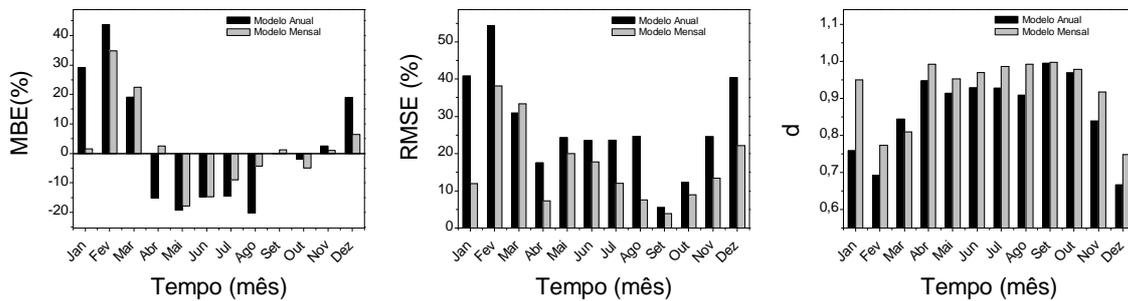


Figura 7 Indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott mensais resultantes da comparação dos modelos mensal e anual, com medidas mensais do ano de 2006.

A evolução mensal do indicativo estatístico RMSE (Fig. 7b) mostra que o desempenho do modelo mensal é melhor que o anual, pois na maioria dos meses ano o valor do RMSE da comparação do modelo mensal e medida mensal foi inferior ao valor da comparação do modelo anual e medida mensal. A exceção ficou apenas para o mês de março, em que o modelo anual foi inferior ao mensal. O indicativo RMSE na estimativa do modelo mensal variou de 3,9% (setembro) a 34,0% (fevereiro), e na estimativa do modelo anual de 5,4% (setembro) a 54,3% (fevereiro)

A evolução mensal do indicativo estatístico d de Willmott (Fig. 7c) mostra que o ajustamento entre estimativa e medida foi melhor no modelo mensal, cujos índices foram superiores aos obtidos pelo modelo anual. Para o modelo mensal, o melhor ajuste ocorreu em setembro, com $d=0,9980$ e o pior em fevereiro, com $d=0,780$, e para o modelo anual, o melhor ajuste $d= 0,9950$ em setembro, e o pior em fevereiro com $d=0,700$.

3.2 Evolução Anual das Radiações Médias Mensais Diárias.

A Tab. 4 mostra as evoluções das médias mensais diárias de cada ano, a evolução anual das médias mensais dos dez anos (período de 1996 a 2005) e a evolução das médias mensais diárias para o ano de 2006. A evolução anual apresentou variações singulares, dependentes das condições atmosféricas relacionada à nebulosidade e umidade, de cada mês e ano. A Fig. 8 mostra os valores da energia média de cada ano da radiação direta na incidência normal no período de 1996 a 2006 para um total de 3382 dias de medidas e os desvios das médias.

A maior energia média anual ocorreu em 2003 com valor de $17,17928 \text{ MJm}^{-2}$ e a menor energia média em 2005 com $14,09966 \text{ MJm}^{-2}$. Os desvios das médias variaram entre 7,9% a 27,8%. No geral, o valor médio entre os 10 anos foi de $15,71033 \text{ MJm}^{-2}$, com desvio médio da ordem 18,4%.

A comparação entre os valores da energia média anual e o valor da energia médio total pode-ser observado na Fig. 8b, por meio dos desvios percentuais calculados pela expressão: $\text{Desvio Relativo}(\%) = (\text{valor da energia média anual} - \text{valor da energia média total} / \text{valor da energia média total}) \times 100$.

Tabela 4. Médias mensais diárias da radiação direta na incidência (MJ m^{-2}) para os anos de 1996 a 2006, e a média e desvio dos 10 anos

Mês	Ano										Média	Desvio (%)	Ano 2006
	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005			
1	--	8,49177	15,77658	10,41778	13,39596	16,81613	11,11945	8,33459	10,85645	8,25748	11,49624	27,75663	12,29117
2	12,33134	18,22961	11,33474	11,83243	12,73056	12,35266	8,57856	18,44933	13,63908	16,57402	13,60523	23,3959	11,11899
3	13,42721	18,91968	15,00243	20,81538	12,19769	17,46582	23,42828	14,71877	16,30741	13,17155	16,54542	21,87305	13,67486
4	17,93373	19,09474	16,14176	20,91603	23,59564	20,83046	23,29175	16,82211	13,24421	15,98482	18,78553	17,95406	19,55274
5	15,14543	17,81824	16,29261	17,87849	18,46901	14,83935	16,27755	21,91817	13,51100	16,22721	16,83771	13,91772	20,58827
6	17,73954	13,29536	15,40788	15,05164	16,49615	13,32062	21,79204	18,86644	14,39370	15,68618	16,20496	16,33187	19,61459
7	19,56659	17,64800	17,68512	17,80598	18,43798	17,82960	17,64069	18,46794	14,44763	16,26379	17,57933	7,852046	18,02708
8	20,21277	21,04313	13,08060	21,82733	15,21641	17,92930	18,25316	20,05244	23,22896	18,06991	18,89140	16,21364	20,85036
9	14,20349	15,27348	11,46600	16,97250	14,81262	17,27015	14,30022	18,71851	18,06303	12,42677	15,35068	15,56327	16,51868
10	15,44528	14,08447	13,19916	15,10664	15,64454	14,62166	17,34815	21,31115	9,93738	9,40794	14,61064	23,44221	16,73940
11	16,17232	12,26203	20,88048	18,57442	15,32870	12,13602	12,49782	14,38311	14,27242	15,69010	15,21974	18,54543	16,58020
12	9,95550	17,01148	14,48072	15,03789	12,42986	10,00179	15,26094	14,10882	14,24784	11,43618	13,39710	17,55617	13,93450
Média	15,64847	16,09767	15,06234	16,85304	15,72959	15,45113	16,64905	17,17928	14,67909	14,09966	15,71033	18,36683	16,62424

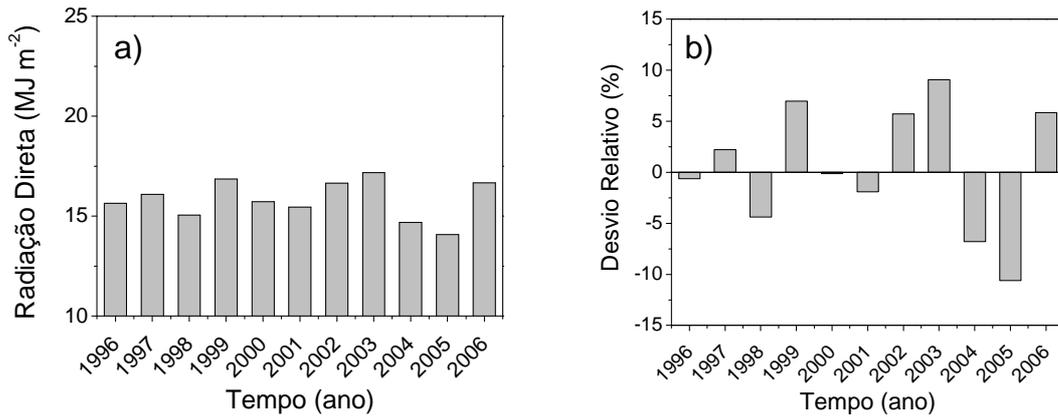


Figura 8. Estatística anual da (a) radiação média mensal diária e (b) desvios da média.

A análise da Fig. 8a mostra um equilíbrio das médias anuais em torno do valor médio total. Em 5 anos (1997, 1999, 2002, 2003 e 2006) a média anual foi superior a média total, e em 5 anos (1996, 1998, 2001, 2004 e 2005) a média anual foi inferior a média total. Na grande maioria dos anos, os desvios das médias anuais estiveram em um nível inferior a 7,0% em relação à média total, e demonstram que a variabilidade da radiação direta na incidência normal média não é muito diferente de um ano para outro, a exceção dos anos de 2003 e 2005, cujo desvio superestimou em 9,0% e subestimou em mais de 10,0%, respectivamente, a média mensal total (Fig. 8b).

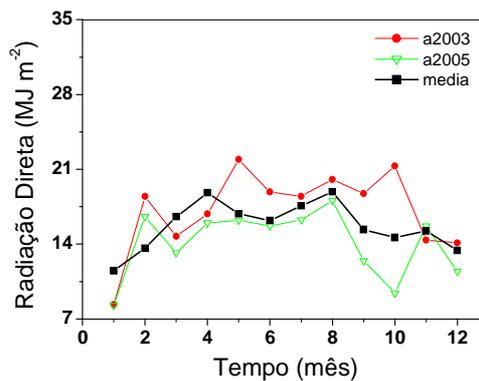


Figura 9. Evolução anual das médias mensais para os anos de 2003, 2005 e média mensal total.

A evolução anual da radiação direta média mensal para os anos de 2003 e 2005, comparada a evolução da radiação direta média mensal total (Fig. 9), mostram as razões pelas quais os anos de 2003 e 2005 apresentaram médias superiora e inferiora, respectivamente, a média mensal total.

A energia média em 2003 foi superiora a energia média total porque vários meses de 2003 (fevereiro, maio, junho, setembro e outubro) foram superiores e com grande diferença, aos meses da média total. Em fevereiro, mês tradicionalmente chuvoso e úmido, em 2003 foi atípico com redução na precipitação e umidade, abaixo da média, o que elevou o nível médio da energia. Em maio e junho, as energias foram elevadas porque a nebulosidade nos dois meses foi baixa em função das fracas frentes frias vindas do sul do país, que normalmente são de maior intensidade. Em setembro e outubro, as energias foram elevadas porque nestes dois meses houve precipitação atípica que limpou a atmosfera, arrastando não só os materiais particulados provenientes da queimada da cultura da cana-de-açúcar e das usinas de açúcar e álcool, que comumente poluem a atmosfera local, como também a nebulosidade.

A energia média em 2005 foi inferiora a energia média total, porque vários meses de 2005 (janeiro, março, abril, setembro, outubro e dezembro) foram energeticamente inferiores aos meses da média total. Em janeiro e dezembro a precipitação e umidade foram as componentes responsáveis pelo decréscimo mais acentuado da energia. Em março e abril, foi a entrada de frentes frias que aumentou a nebulosidade, e maio, junho e julho não houve diferença significativa nos valores médios de energia. Em setembro e outubro, na ausência de chuvas, muito provavelmente, foi a presença de aerossóis na atmosfera que absorveu consideravelmente a radiação direta na incidência normal, comparada aos demais anos.

A Fig. 10 mostra a curva polinomial ajustada à evolução da anual da radiação direta média mensal dos 10 anos. Os valores médios dos meses da radiação direta seguiram a tendência da evolução anual média mensal do número de horas de brilho solar do período experimental. Os valores médios mensais foram crescentes do menor valor (11,48624MJm⁻²) em janeiro até o valor (18,78552MJm⁻²) em abril, na mesma proporção do crescimento do número de horas de brilho

solar acumulada, de 166 horas a 230 horas. Esse período coincide com o decréscimo do período chuvoso onde as concentrações da nebulosidade e vapor de água são decrescentes.

Nos meses de maio e junho, os valores médios diminuíram para $16,8377\text{MJm}^{-2}$ e $16,20495\text{MJm}^{-2}$ em função do decréscimo do número de horas de brilho solar, de 223 horas a 179 horas. Esse período marca a entrada das frentes frias vindas do sul do país, as quais aumentam a nebulosidade e umidade na atmosfera, diminuindo a insolação como mostrado na Fig. 10b

De julho a agosto, os valores médios aumentaram para $17,57933\text{MJm}^{-2}$ e $18,89140\text{MJm}^{-2}$ em função do crescimento do número de horas de brilho solar, de 230 horas a 253 horas. Esses meses marcam o inverno, período seco e ensolarado.

Nos meses de setembro a dezembro, os valores médios diminuíram de $15,35068\text{MJm}^{-2}$ a $13,3971\text{MJm}^{-2}$ em função do início do período chuvoso e decréscimo do número de horas de brilho solar, de 207 horas a 193 horas.

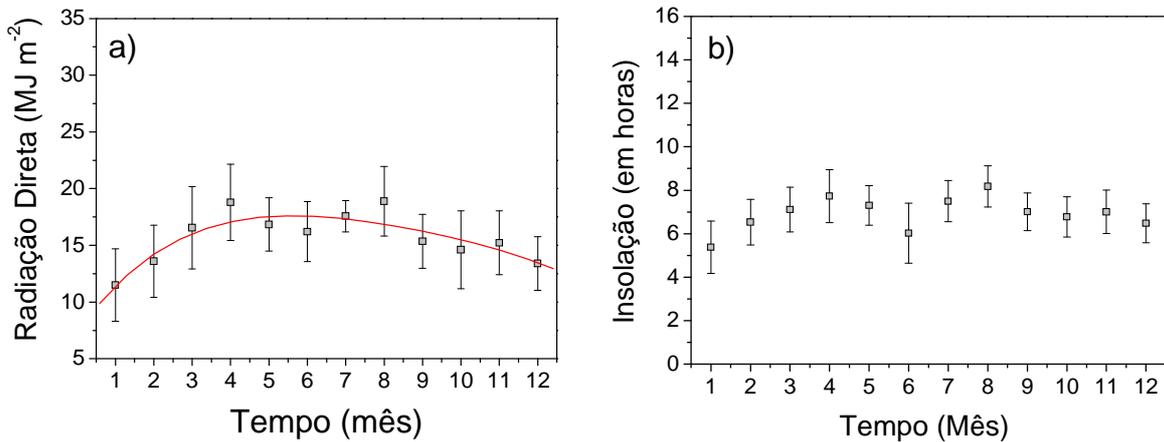


Figura 10. Evolução anual da (a) radiação direta média mensal dos 10 anos e a curva polinomial ajustada; (b) insolação média mensal.

A equação temporal ajustada para a evolução anual é polinomial de quarta ordem, conforme abaixo representada:

$$\langle H_b^m \rangle = 7,27602 + 4,84399 t - 0,78897 t^2 + 0,05358 t^3 - 0,00149 t^4 \quad (2)$$

onde, t representa o tempo em meses.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,80$) expressa que a qualidade do ajuste é bom estatisticamente comparado a resultados de modelos estatísticos na equipartição mensal, que também é da ordem de 0,80, como é o caso dos Modelos de Angstrom citados na literatura. Apenas nos meses de abril e agosto os valores médios se afastaram da curva de regressão ajustada ao modelo experimental. Os desvios da média foram maiores nos meses do período chuvoso: janeiro, fevereiro novembro e dezembro, com valores superiores a 20%. No período da seca, meses de março, abril, maio, junho, agosto, setembro e outubro, os desvios situaram-se entre 4,0% a 20%.

A Fig. 11a mostra a comparação da radiação direta do modelo experimental dos 10 anos e a medida do ano de 2006 e a Fig. 11b mostra a radiação direta estimada pela equação (2) e a medida do ano de 2006, em função do tempo em mês.

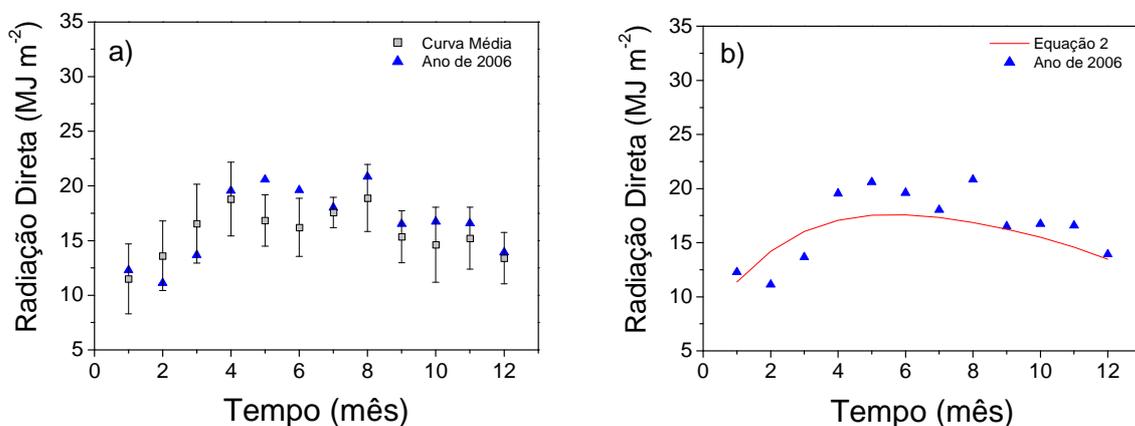


Figura 11. Validação dos modelos: (a) Comparação entre modelo experimental da radiação direta medida (média mensal dos 10 anos) e a medida do ano de 2006; (b) Radiação direta estimada pelo modelo polinomial ajustado e a medida em 2006.

A comparação entre as radiações diretas obtida pelo modelo experimental e a medida no ano de 2006 (Fig. 11a), mostra que na grande maioria dos meses, a radiação média mensal medida em 2006 encontra-se dentro dos desvios da média. Apenas nos meses de maio e junho o modelo subestimou as medidas experimentais. Nos demais meses, a medida está inserida dentro do intervalo de variação da estimativa. Uma análise na base de dados do número de horas de brilho solar acumulados no período de 1996 a 2006 mostrou que o brilho solar em maio (260 horas) e junho (230 horas) de 2006 foram atípicos e muito superiores aos valores médios destes dois meses na série de 10 anos, que são 223 horas e 178 horas respectivamente. A comparação entre radiação direta estimada pelo modelo polinomial ajustado e a medida em 2006 (Fig. 7b) mostra por meio dos indicativos estatísticos que o modelo polinomial de quarta ordem subestimou a medida em torno de 6% (5,8%), com espalhamento na ordem de 13,2% e ajustamento de 0,80.

CONCLUSÕES

Com uma base de dados da radiação solar direta na incidência normal, medida nos anos de 1996 a 2006 em Botucatu, determinou-se a série diurna das médias horárias dos anos e dos meses, e a série anual das médias mensais diárias.

A evolução diurna das médias horárias anuais (modelo experimental médio dos 10 anos) obedeceu a uma função temporal do tipo polinomial de quarto grau, com elevado coeficiente de determinação $R^2=0,9990$. O máximo da radiação direta média horária, entre 11h às 12h, variou do intervalo de energia $2,20195\text{MJm}^{-2}$ a $1,77088\text{MJm}^{-2}$ com média de $1,97521\text{MJm}^{-2}$. Os desvios percentuais da radiação direta média horária entre os 10 anos foram mais elevados (23,0%) no início e final do dia, e menores no meio do dia (7,3%). Para o intervalo horário principal do dia, das 7h30 às 17h30, o desvio médio foi da ordem de 8,4%, demonstrando que a variação da radiação direta média horária é relativamente pequena entre os anos.

A comparação entre o modelo experimental anual e a medida do ano de 2006 mostrou elevada concordância na estimativa da radiação direta, enquanto que a validação entre a estimativa do modelo polinomial e a medida da radiação direta em 2006 confirmou, por meio dos indicativos estatísticos (MBE=2,0%, RMSE= 4,8%, $d=0,9960$), que o modelo polinomial subestimou a medida com baixo nível de espalhamento e elevado índice de ajustamento.

A evolução da fração solar média horária K_b obtida por meio da divisão da radiação direta na incidência normal pela constante solar horária ($4,921\text{MJm}^{-2}$) seguiu a mesma tendência da evolução da radiação direta média horária. As menores frações ocorreram nos intervalos horários inicial e final do dia, e foram por volta de $K_b=0,07$ e o maior no meio dia solar de $K_b=0,39$.

O efeito da sazonalidade na previsão do modelo experimental ou série diurna média horária anual foi demonstrado por meio da comparação com as evoluções diurnas mensais de janeiro (mês úmido e nebuloso) e agosto (mês seco e ensolarado). Os resultados mostram que o modelo anual estimou com melhor precisão a radiação direta no mês de agosto (2,5%) do que janeiro (13,7%).

A evolução diurna da radiação direta média mensal horária apresentou variações em função da variabilidade atmosférica diária característica de cada mês e obedeceram também a uma função temporal do tipo polinomial de quarto grau, com coeficiente de determinação superior a 0,9812. Para o período chuvoso, com elevada concentração de nuvens e vapor de água, os meses de janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro apresentam as energias médias mensais diárias inferiores à dos meses do período da seca e ensolarados como, abril, maio, junho, julho, agosto e setembro.

Os indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott obtidos na validação do modelo anual horário estimando a radiação direta média mensal e na validação do modelo mensal estimando a radiação direta média mensal horária, quando comparadas com a medida da radiação direta horária em 2006, mostram que: MBE foi melhor para modelo de estimativa mensal, cujos valores foram menores aos valores obtidos com o modelo de estimativa anual. Para o indicativo RMSE, na grande maioria dos meses, o modelo mensal foi melhor que o modelo anual. O indicativo estatístico d de Willmott mostrou que o ajustamento entre estimativa e medida foi melhor no modelo mensal, cujos índices foram superiores aos obtidos pelo modelo anual. No geral os melhores ajustes ocorreram em setembro e os piores em fevereiro.

A evolução anual apresentou variações singulares, dependentes das condições atmosféricas relacionadas à nebulosidade e umidade de cada mês. Os valores médios mensais foram crescentes do menor valor ($11,49624\text{MJm}^{-2}$) em janeiro até o valor ($18,78553\text{MJm}^{-2}$) em abril, na mesma proporção do crescimento do número de horas de brilho solar e decréscimo da nebulosidade e vapor de água na atmosfera. Nos meses de maio e junho, os valores médios diminuíram para $16,83771\text{MJm}^{-2}$ e $16,20496\text{MJm}^{-2}$ em função do decréscimo do número de horas de brilho solar devido à entrada das frentes frias vindas do sul do país, as quais aumentam a nebulosidade e umidade na atmosfera.

De julho a agosto, os valores médios aumentaram para $17,57933\text{MJm}^{-2}$ e $18,89140\text{MJm}^{-2}$ em função do crescimento do número de horas de brilho solar devido à entrada do inverno, período seco e ensolarado. Nos meses de setembro a dezembro, os valores médios diminuíram de $15,35068\text{MJm}^{-2}$ a $13,39710\text{MJm}^{-2}$, em função do início do período chuvoso e úmido, que reduz o número de horas de brilho solar.

A evolução anual média dos 10 anos foi proporcional à insolação. A equação temporal anual apresentou coeficiente de determinação (R^2) na ordem de 0,80.

Agradecimentos Os autores expressam seus agradecimentos à FAPESP e CNPq, pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- Fröhlich C, London J. Revised Instruction manual on radiation instruments and measurements. WCRP Publications series No. 7. WMO/TD No. 149, Geneva (Switzerland), 1986, 139pp
- Gomes, E.N., Escobedo, J.F., Oliveira, A.P., Soares, J. 2006. Evolução diurna e anual da radiação direta na incidência. *Avances em Energias Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 10, pp. 129-136.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. New York: Academic Press, 1983. 390p
- Plana-Fattori, A.; ROZANTE, J. R. 1997. Pireliometria de banda larga e turbidez atmosférica em São Paulo. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 15, n. 3, p. 252-274.
- Plana-Fattori, A. Avaliações da Turbidez Atmosférica a partir de medidas pireliométricas. 1989. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo.
- Stone, R. J. 1993. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, v.51, n.4, pp.289-291.
- Willmott, C.J. 1981. On the validation of models. *Physical Geography*. v.2, p.184-194.

Abstract. In this work, the seasonal variation is analyzed and a fourth order polynomial model was developed to estimate the diurnal evolution of direct solar radiation at the surface using measurements carried out from 1996 to 2005 in Botucatu, São Paulo, Brazil. This analysis indicated that mean hourly values varied between 2.20 MJ m^{-2} to 1.77 MJ m^{-2} . The fourth order polynomial derived by linear regression was able to simulate the hourly values with coefficient of determination of 0.99867. The validation indicated that MBE equal to 1.0%, a RMSE equal to 3.7% and index of agreement equal to 0.9980. These statistical parameters indicate that model overestimates observations and show a very low level of statistical dispersion. Discrepancies are attributed to climate variations.

Key words: *Direct solar radiation, regression modelling, Botucatu.*