

EVOLUÇÃO ANUAL DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA (LW) MEDIA MENSAL, HORÁRIA E DIÁRIA, EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

Eduardo Nardini Gomes¹

João Francisco Escobedo¹

Alexandre Dal Pai²

Amauri Pereira de Oliveira³

Jacyra Soares³

Geórgia Codato³

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

2 Faculdade de Tecnologia - FATEC, Botucatu, São Paulo, Brasil

3 Departamento de Ciências Atmosféricas, IAG, USP, São Paulo, Brasil.

RESUMO: No trabalho é descrita a obtenção da série anual da radiação de onda longa atmosférica (LW) média mensal, horária e diária para uma base de dados de LW medida em Botucatu/SP/Brasil, no período de 2000 a 2006. A análise mostrou que a evolução anual da LW média mensal, horária e diária, segue evolução anual da temperatura do ar média mensal: o valor de LW foi mais elevado no mês em que a temperatura do ar foi mais elevada (janeiro) e menos elevada no mês de menor temperatura (julho). A equação temporal de regressão, ajustada para a evolução anual media mensal horária e diária, é do tipo polinomial de quinta ordem representada por:

$$LW_{(horária)}=1,30466+0,06564T-0,03085T^2+0,00223T^3+1,32665E-4T^4-1,18149E-5 T^5$$

$$LW_{(diária)}=30,97778+1,83463T-0,80837T^2+0,06108T^3+0,00281T^4 -2,76614E-4 T^5$$

Os coeficientes de determinação $R^2=0,9790$ (horário) e $R^2=0,9784$ (diário) expressam que a qualidade do ajuste é estatisticamente elevada e mostra que a LW esta muito bem correlacionada no tempo em meses.

Palavras-chave: radiação de onda longa atmosférica, evolução anual.

ANNUAL EVOLUTIONS OF MONTHLY HOURLY AND DAILY DOWNWARD ATMOSPHERIC LONGWAVE RADIATION (LW) AT THE SURFACE IN BOTUCATU, SÃO PAULO, BRAZIL.

ABSTRACT: In this work the hourly, daily and monthly evolution of the downward atmospheric longwave radiation (LW) measured between 2000 and 2006 in Botucatu, São Paulo, Brazil is described. The observations indicated that the monthly averaged values of LW is larger in January (Summer) and smaller in July (winter). The 5th order equations were adjusted by polynomial regression to the hourly and daily values of LW are given by:

$$LW_{(hourly)}=1,30466+0,06564T-0,03085T^2+0,00223T^3+1,32665E-4T^4-1,18149E-5 T^5$$

$$LW_{(daily)}=30,97778+1,83463T-0,80837T^2+0,06108T^3+0,00281T^4 -2,76614E-4 T^5$$

with determination coefficients $R^2=0.9815$ (hourly) and $R^2=0.9879$ (daily), respectively.

Keywords: downward atmospheric longwave radiation, annual evolution.

2. INTRODUÇÃO

O conhecimento da energia anual da radiação de onda longa atmosférica (LW), por meio das séries temporais ou por modelos de estimativas (Ångström, 1918; Brunt, 1932; Swinbank, 1963; Brutsaert, 1975; Dilley e O'Brien, 1998; Idso, 1981; Prata, 1996; Niemelä, 2001, entre outros), são importantes para os estudos climáticos, balanço de energia em superfícies, e para a quantificação de perda de energia térmica em sistemas de captação solar como os coletores solares planos e sistema de concentração. No Brasil, a pesquisa da radiação solar é limitada e restrita a universidade e alguns órgãos públicos de pesquisa. São poucas as estações meteorológicas que medem radiação solar, e em número muito menor, são aquelas que medem as radiações de onda longa.

Com o propósito de conhecer melhor os níveis de energia LW no ano, bem como suas dependências sazonais em função das variações climáticas com nebulosidade, temperatura e umidade, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP/Brasil monitora essa radiação desde o ano 2000. 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 já seriam suficientes para indicar as tendências no dia e ano.

O desenvolvimento das séries temporais ou modelos temporais é muito importante porque permite estimar a LW média mensal horária ou diária, em função apenas do tempo, não necessitando de outras medidas como os modelos de estimativas estatísticos. A grande vantagem do modelo temporal é a economia de custo do equipamento e manutenção de outros equipamentos de medida, além de que o modelo pode ser utilizado em regiões climaticamente similares a de Botucatu, onde o projeto foi desenvolvido.

Assim, considerando as necessidades do conhecimento da LW para muitas áreas de pesquisa que se encontram em plena atividade no Brasil, o presente trabalho teve os seguintes objetivos: 1) Analisar estatisticamente a base de dados da radiação atmosférica horária e diária, e determinar as médias mensais por ano, desvios e o intervalo de variação; 2) elaborar a evolução anual da LW média mensal horária e diária; 3) Propor um modelo temporal da LW horário e diário para a evolução anual médias mensais horário e diário; 4) Validar o modelo temporal anual horário e diário para uma base de dados independente (ano de 2006).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Clima.

As medidas foram realizadas na Estação de Radiometria Solar de Botucatu, FCA, UNESP, Botucatu-SP, com coordenadas geográficas: latitude de $22^{\circ}54'$ S, longitude de $48^{\circ}27'$ W e altitude de 786 m. O clima é temperado quente (mesotérmico) com chuvas no verão e seca no inverno. 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 fevereiro e julho são o mais quente e frio do ano, respectivamente, com temperaturas médias de $23,2C^{\circ}$ e $17,1C^{\circ}$, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente. A nebulosidade é mais elevada nos meses de janeiro ($f=0.61$) e menor em agosto ($f=0.27$). Contrastando com 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. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm. (Figura 1).

Botucatu é uma cidade do tipo universitária, com 120.800 habitantes, e está inserida em uma região rural com plantações de cana-de-açúcar e eucaliptos. Porém, 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.

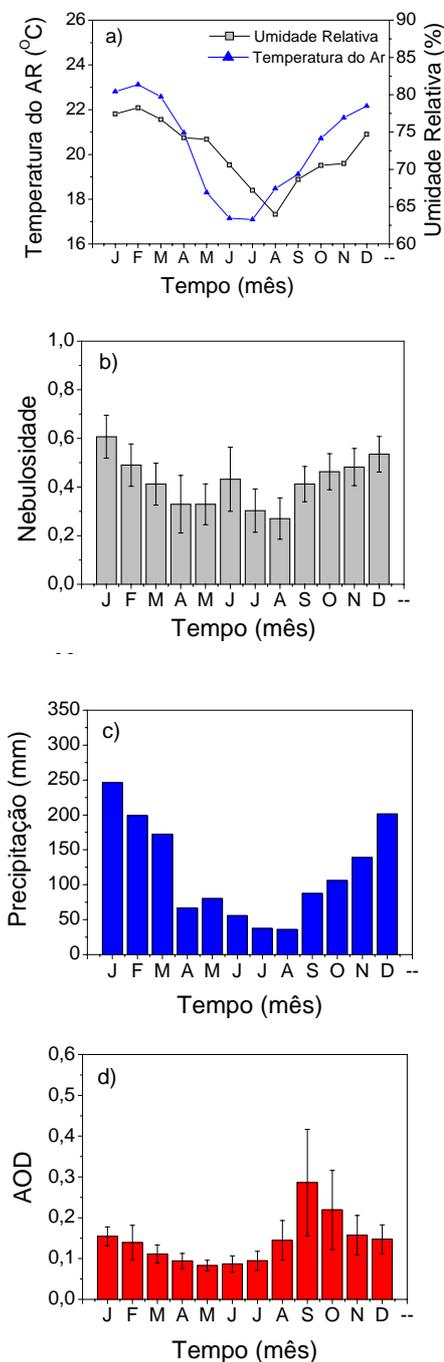


Figura 1. Séries da temperatura, Umidade, Nebulosidade, Precipitação e Aerossóis em Botucatu.

A evolução anual das médias mensais diárias da AOD (profundidade ótica de aerossóis) obtidas pelo satélite AQUA-MIR do período de 2000 a 2005 (figura 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 $70,0 \text{ ug.m}^{-3}$ (Codato et al., 2008). Com a entrada do período chuvoso em outubro, a concentração de aerossóis decresce gradativamente, aos valores de $AOD=0,16$ ou $20,0 \text{ ug.m}^{-3}$ em dezembro. Nos meses do ano seguinte, de janeiro até junho, a concentração de aerossóis continua a decrescer até atingir, no mês de maio, o menor nível de concentração PM_{10} , antes de iniciar o novo ciclo.

3.2 Instrumentação

A medida da irradiância da LW atmosférica foi realizada através de um pirgeômetro, modelo CG1 da Kipp & Zonen, na altura de 2 metros, a partir da superfície do solo gramado. A sensibilidade espectral do aparelho encontra-se na faixa de comprimento de onda de 5 a $50 \mu\text{m}$ e o fator de calibração é de $10,75 \mu\text{V W}^{-1} \text{ m}^2$.

O pirgeômetro é um instrumento de monitoramento padrão da LW, ao nível de superfície, recomendado pela World Climate Research Program Baseline Surface Radiation Network (UDO, 1999).

O detector térmico é protegido por uma janela de silício que é internamente revestida por uma película. Esta película evita que a radiação solar chegue ao detector térmico. Devido ao aquecimento da janela de silício, provocado pela radiação solar, a temperatura da janela torna-se superior à temperatura da termopilha. Isto gera um sinal espúrio que deve ser eliminado. Segundo o fabricante, para cada 1000 W m^{-2} de radiação solar perpendicularmente incidente na janela plana do pirgeômetro, são gerados 25 W m^{-2} de onda longa. Portanto a correção que deve ser aplicada é dada pela expressão:

$$L = L_{obs} - 0,025R_g$$

onde L_{obs} é a média de 5 minutos da irradiância de onda longa registrada e R_g é a média de 5 minutos da irradiância global, medidas simultaneamente.

A irradiância global na horizontal foi medida através de um piranômetro Eppley, sendo o fator de calibração igual a $7,47 \mu V W^{-1} m^2$. A temperatura e a umidade relativa do ar foram medidas através de um sensor HMP45C (Vaisala).

A pressão parcial do vapor d'água, e , foi estimada por: $e = (UR/100)e_s$, sendo e_s a pressão de saturação do vapor d'água dada pela equação de Tétens.

Na aquisição e armazenamento dos dados, utilizou-se um "datalogger", modelo 23X da Campbell Scientific, programado para armazenar médias de 5 minutos das irradiâncias, temperatura e umidade relativa.

3.3. Indicativos Estatísticos

Os índices estatísticos utilizados na validação dos modelos são: MBE (Mean Bias Error) e RMSE (Root Mean Square Error) sugeridos por Iqbal (1983) são dados pelas expressões:

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

onde: P_i são os valores estimados, O_i os valores medidos e N o número de observações.

Se o resultado do MBE for menor que zero ocorre subestimativa do modelo testado, do contrário o modelo superestima as medidas. Quanto maior for o valor de RMSE mais espalhados estão as medidas em torno do modelo.

Outro índice estatístico bastante usado na análise de modelos é o d de Willmott(1981) dado por:

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

sendo que $|P_i| = |P_i - \bar{O}_i|$ e $|O_i| = |O_i - \bar{O}_i|$, e \bar{O}_i representa a média dos valores medidos.

Quanto mais próximo de 1 estiver d , mais o modelo segue a tendência dos dados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Estatística da LW Horária

A figura 2 mostra a evolução da radiação de ondas longas horária do período de 2000 a 2006, num total de 60386 radiações horárias. A evolução da LW é periódica no tempo, onde a sazonalidade é resultante da variação astronômica e geográfica da radiação global, ou seja, a energia horária da LW é maior no verão e primavera, quando o sol declina no mais próximo da latitude local, e menor no outono e inverno, quando o sol declina mais distante.

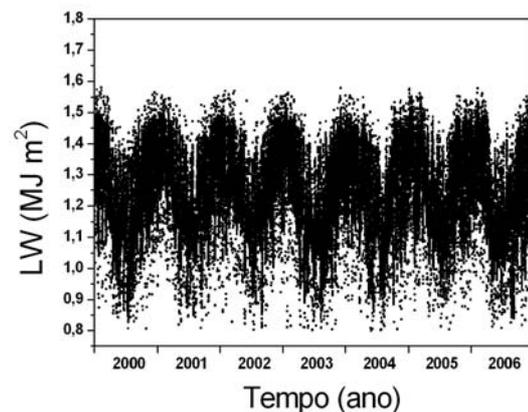


Figura 2. Evolução da LW horária do período de 2000 a 2006 em Botucatu.

As concentrações da nebulosidade nas estações do verão e primavera são maiores que no outono e inverno, e conseqüentemente, é maior a fonte da radiação de ondas longas da atmosfera emitindo para a superfície terrestre. O intervalo de variação da LW, diferença entre o menor e maior valor horário, foi de $0,8 MJ/m^2$ a $1,6 MJ/m^2$ entre o verão e inverno.

Na tabela 1 é mostrada a análise estatística da LW no período de 2000 a 2006, quanto ao número de radiações horárias por ano, energia média, desvio da média e a amplitude

de variação (diferença entre a LW máxima e mínima).

O valor médio anual da LW, variou entre 1,227MJ m⁻² (2003) a 1,247MJ m⁻² (2001 e 2002). O desvio da média variou de 10,52% (2000) a 11,87% (2003) com uma diferença pouco superior a 1,0% (Figura 3a). O desvio da media anual da LW é consideravelmente inferior aos desvios da média anual das radiações de ondas curtas, como por exemplo para as radiações global, UV, PAR e IV (Escobedo et al., 2009). A radiação LW mínima e máxima, bem como a amplitude de variação, praticamente se repetiram ano a ano, em torno dos valores médios de 0,8MJ/m², 1,57MJ/m² e 0,77MJ/m², respectivamente.

Tabela 1. Análise estatística da LW de 2000 a 2006, onde é mostrado o ano, número de horas, energia média (em MJm⁻²), desvio percentual, amplitude (máxima e mínima) de variação (em MJm⁻²)

| Ano | Horas | Média | Desvio | Mín. | Max. | Var. |
|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 2000 | 8688 | 1,240 | 11,52 | 0,806 | 1,580 | 0,774 |
| 2001 | 8636 | 1,247 | 10,90 | 0,808 | 1,555 | 0,747 |
| 2002 | 8494 | 1,247 | 10,61 | 0,802 | 1,569 | 0,767 |
| 2003 | 8587 | 1,227 | 11,87 | 0,802 | 1,578 | 0,777 |
| 2004 | 8581 | 1,230 | 11,53 | 0,801 | 1,554 | 0,753 |
| 2005 | 8655 | 1,243 | 10,75 | 0,804 | 1,576 | 0,773 |
| 2006 | 8745 | 1,230 | 11,84 | 0,808 | 1,578 | 0,770 |
| média | | 1,238 | 11,29 | 0,80 | 1,580 | 0,779 |

O desvio percentual (D%) obtido da comparação da LW energia média do período de 7 anos (média total) em relação à LW média anual, mostra a variabilidade da radiação por ano na figura 3b, sendo expressa pela expressão:

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

Os desvios da média inferiores a 1% mostram que não existe diferença estatística da radiação LW horária média de um ano a outro. O desvio da média, a radiação LW mínima e máxima, e a amplitude de variação, foram aproximadamente constantes entre os anos.

A baixa variabilidade da energia média, desvio da média e a amplitude de variação da LW demonstram que as características atmosféricas e os eventos climáticos em Botucatu como: precipitação convectiva de novembro a março, que aumenta a pressão de vapor da água; as entradas de frentes frias provenientes do sul do país, que aumentam a nebulosidade nos meses de maio e junho, e a poluição das queimadas da cultura da cana-de-açúcar e das usinas que produzem o álcool e açúcar, que aumentam a concentração de aerossóis na atmosfera a partir de agosto até novembro se repetem anualmente, mantendo as variações dos parâmetros meteorológicos da atmosfera local aproximadamente igual ano a ano.

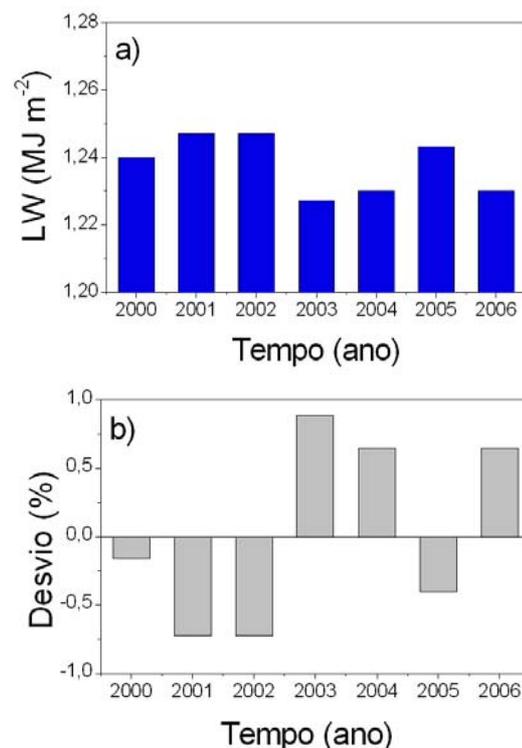


Figura 3. a) Valores da LW média horária por ano, b) desvio entre o valor de LW médio total e o valor de LW médio por ano.

4.2 Evolução Anual da LW Média Mensal Horária

A tabela 2 mostra os valores da LW média horária dos meses e desvio.

A figura 4 mostra: a) a evolução anual da LW média mensal horária e desvio da média entre anos, obtida a partir dos valores da LW média mensal horária (tabela 2); b) A média mensal horária Total (Fig. 4b).

A evolução anual da LW média mensal horária acompanha as evoluções médias mensais da temperatura, umidade, precipitação e nebulosidade, mostradas na figura 1.

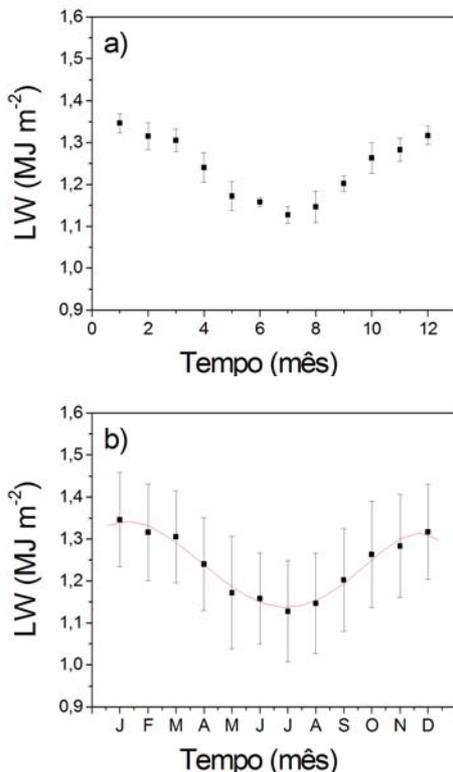


Figura 4. Evolução anual da LW média mensal horária (modelo experimental) e curva ajustada pela equação polinomial.

A energia da LW média mensal horária é maior nos meses nos quais a temperatura, umidade, precipitação e nebulosidade são mais elevadas no ano. A LW média mensal horária é menor nos meses de menores energias, abril, maio, junho, julho, agosto e setembro, devido a baixa temperatura, umidade e nebulosidade.

A figura 4b mostra também a equação de regressão polinomial gerada por meio da

evolução experimental da LW média mensal horária em função do tempo (em meses).

Tabela 2. Evoluções ou Série Anual dos valores da LW Média horária dos meses e Desvios da Média (Fig.4a) e Desvio total (Fig. 4b) em MJ m⁻²

| Mês | LW Média | Desvio da Média | Desvio Total |
|-----|----------|-----------------|--------------|
| Jan | 1,35 | 0,02 (1,5%) | 0,11 (8,1%) |
| Fev | 1,32 | 0,03 (2,3%) | 0,12 (9,1%) |
| Mar | 1,31 | 0,03 (2,3%) | 0,11 (8,4%) |
| Abr | 1,24 | 0,04 (3,2%) | 0,11 (8,9%) |
| Mai | 1,17 | 0,03 (2,6%) | 0,13 (11,1%) |
| Jun | 1,16 | 0,01 (0,9%) | 0,11 (9,5%) |
| Jul | 1,13 | 0,02 (1,8%) | 0,12 (10,6%) |
| Ago | 1,15 | 0,04 (3,5%) | 0,12 (10,4%) |
| Set | 1,20 | 0,02 (1,7%) | 0,12 (10,0%) |
| Out | 1,26 | 0,04 (3,2%) | 0,13 (10,3%) |
| Nov | 1,28 | 0,03 (2,3%) | 0,12 (9,4%) |
| Dez | 1,32 | 0,02 (1,5%) | 0,11 (8,3%) |

O melhor ajuste foi de uma função de quinto grau, que apresentou o maior coeficiente de determinação ($R^2= 0,9790$), representada por:

$$LW(\text{horária})=1,30466+0,06564T-0,03085T^2+0,00223T^3+1,32665E-4T^4-1,18149E-5T^5$$

A Figura 5 mostra a comparação do modelo experimental da LW horária com a medida do ano de 2006; e a LW estimada pelo modelo polinomial horário e a medida de 2006.

Na maioria dos meses os valores de LW de 2006 estão enquadrados dentro do modelo experimental.

O coeficiente de determinação $R^2= 0,9790$ mostra que a LW média mensal horária esta bem correlacionada com os intervalos de tempo horário. A curva gerada do modelo polinomial temporal de estimativa da LW se enquadrado dentro de todos os intervalos de variação das médias experimentais, representados pelos desvios em cada mês.

A validação por meio dos indicativos estatísticos mostrou que em geral ocorre superestimativa inferior a 1% (0,95%), espalhamento de 2,71% e elevado índice de ajustamento de 0,96.

4.3. Estatística da LW diária

A figura 6 mostra a evolução temporal da radiação de ondas longa diária medida em Botucatu no período de 2000 a 2006, num total de 2505 radiações diárias.

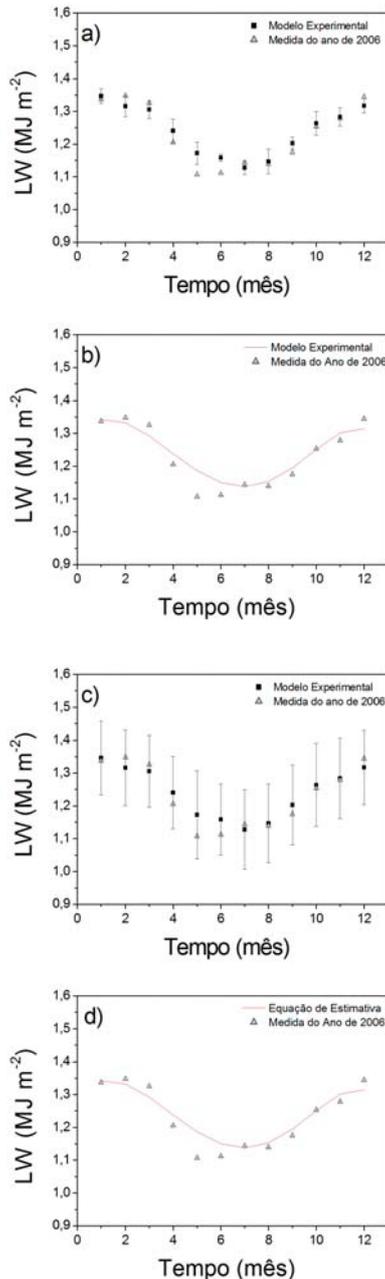


Figura 5. (a) Comparação entre modelo experimental da LW horário e a medida do ano de 2006; (b) LW estimada pelo modelo polinomial horário e a medida de 2006.

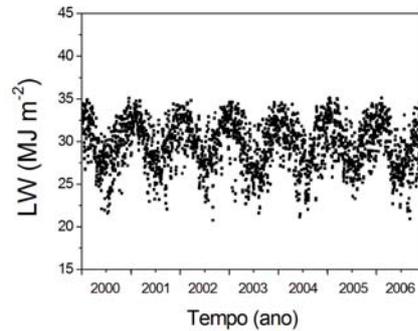


Figura 6. Evolução da radiação de ondas longas LW diária para os anos de 2000 a 2006.

Similarmente a evolução da LW horária, a LW diária de cada ano é periódica no tempo, com valores máximos no verão e primavera, onde a nebulosidade, temperatura e umidade são mais elevadas, e mínimas no inverno e outono, condição climática contrária a do verão e primavera.

A tabela 3 mostra a estatística da LW para os anos de 2000 a 2006, representada pelo número de dias, média anual, desvio percentual, mínimo, máximo e variação. Devido a problemas elétricos na estação de radiometria solar, foram perdidos 5 dias de leitura da LW em 2000, 8 dias em 2001, 15 em 2002, 7 em 2003, 11 em 2004 e 6 em 2005.

Tabela 3: Análise estatística da LW diária, onde é mostrado o ano, radiação, número de dias, energia média, desvio, amplitude (máxima e mínima) e variação da LW

| Ano | Dias | Mé a | Desvi o | Mín. | Max. | Var. |
|------|------|---------|------------|-----------|-----------|-----------|
| 2000 | 361 | 29,74 | 9,69 | 21,5 9 | 35,0 9 | 13,5 0 |
| 2001 | 357 | 29,86 | 9,05 | 22,0 7 | 34,7 7 | 12,7 0 |
| 2002 | 350 | 29,90 | 8,64 | 20,7 6 | 34,8 3 | 14,0 7 |
| 2003 | 358 | 29,25 | 10,41 | 21,6 3 | 34,6 5 | 13,0 2 |
| 2004 | 355 | 29,51 | 9,79 | 21,1 6 | 34,5 5 | 13,3 8 |
| 2005 | 359 | 29,86 | 8,67 | 23,3 2 | 35,1 3 | 11,8 1 |
| 2006 | 365 | 29,51 | 10,19 | 20,9 3 | 35,1 2 | 14,1 9 |

Médi

a 29,66 9,53

A LW diária variou entre o valor mínimo de $20,76\text{MJm}^{-2}$ (em 02/09/2002) e o máximo de $35,13\text{MJm}^{-2}$ (em 19/01/2005), com média total de $29,66\pm 2,83\text{MJm}^{-2}$. Não houve diferença significativa na LW diária média anual, que situou-se entre $29,25\text{MJm}^{-2}$ (no ano de 2003) e $29,90\text{MJm}^{-2}$ (no ano de 2002), como expresso na figura 7a.

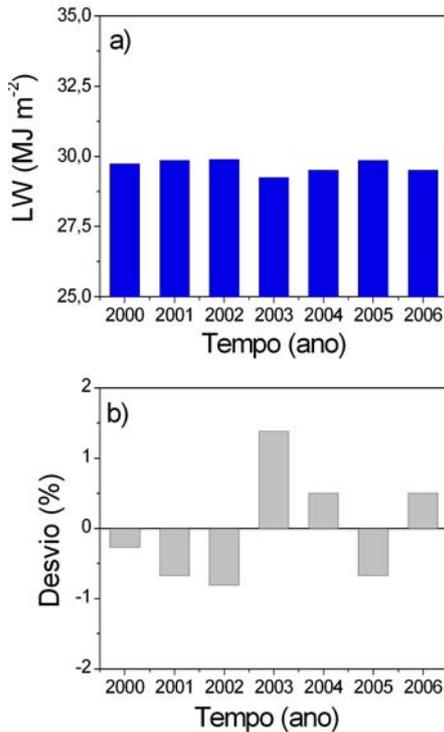


Figura 7. (a) Valores da LW média diária por ano; (b) desvio entre o valor de LW médio total e o valor de LW médio por ano.

A figura 7a mostra que a LW média diária variou pouco entre os anos, apresentando desvios da média inferiores a 1,4%, indicando também que não existe diferença estatística da radiação LW horária média de um ano a outro.

A figura 8 mostra a evolução anual da LW média mensal diária para os anos de 2000 a 2005 e a curva média e desvio da média mensal entre os anos.

A figura 9 mostra a série média entre os 6 anos (2000 a 2005) da LW média mensal diária e a curva polinomial ajustada

A evolução anual média da LW média mensal diária variou sazonalmente, com início do ciclo em janeiro, o qual apresentou a maior energia média entre anos ($32,17\pm 0,39\text{MJm}^{-2}$), decrescendo posteriormente e continuamente até o mês de julho, que apresentou menor energia média entre os anos ($27,06\pm 0,45\text{MJ m}^{-2}$), voltando a crescer novamente até dezembro ($31,65\pm 0,55\text{MJ m}^{-2}$), completando o ciclo anual.

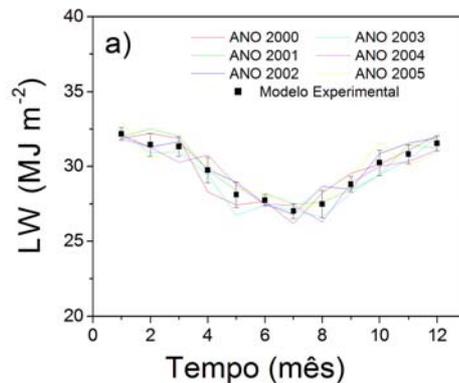
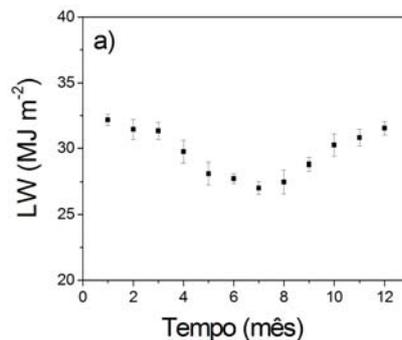


Figura 8. Evolução anual da LW média mensal diária para os anos de 2000 a 2005 e a curva média e desvio da média mensal entre os anos.



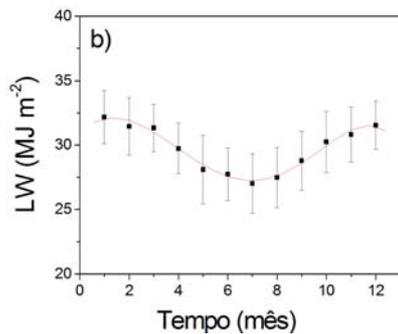


Figura 9. Evolução anual média entre os anos da LW média mensal diária e curva polinomial ajustada.

Os maiores desvios ocorreram no mês de maio ($0,97\text{MJ m}^{-2}$), e os anos responsáveis por esta mais elevada variação em torno da média foram 2002, 2003 e 2004, já os menores desvios da média ocorreram em janeiro ($0,39\text{MJ m}^{-2}$), provavelmente por se tratar de um mês em que ocorre uma maior estabilidade atmosférica dos elementos climáticos como da nebulosidade, precipitação, umidade e temperatura entre os anos analisados.

A equação temporal ajustada para a evolução anual (Figura 8) é polinomial de quarta ordem, conforme abaixo representada:

$$\text{LW}(\text{diária}) = 30,97778 + 1,83463T - 0,80837T^2 + 0,06108T^3 + 0,00281T^4 - 2,76614E-4T^5$$

onde, T representa o tempo em meses. O coeficiente de determinação ($R^2=0,9784$) expressa que o ajuste foi elevado e mostra que a LW está bem correlacionada com o tempo todos os meses do ano.

A Tabela 4 mostra as Evoluções ou Série Anual dos valores da LW Média diária dos meses representados na Figura 9(a) e 9 (b), os Desvios da Média (Fig. 9a) e Desvio Total (Fig. 9b) em MJ m^{-2} .

Tabela 4. Evoluções ou Série Anual dos valores da LW Média diária dos meses (Fig.9a e 9b) e Desvios da Média (Fig.9a) e Desvio Total (Fig.9b) em MJ m^{-2}

| Mês | LW Média | Desvio da Média | Desvio Total |
|-----|----------|-----------------|--------------|
|-----|----------|-----------------|--------------|

| | | | |
|-----|------|-------------|-------------|
| Jan | 32,2 | 0,42 (1,3%) | 0,39 (1,2%) |
| Fev | 31,6 | 0,76 (2,4%) | 0,78 (2,5%) |
| Mar | 31,4 | 0,66 (2,1%) | 0,63 (2,0%) |
| Abr | 29,6 | 0,85 (2,9%) | 0,84 (2,8%) |
| Mai | 27,9 | 0,85 (3,0%) | 0,97 (3,5%) |
| Jun | 27,6 | 0,38 (1,4%) | 0,53 (1,9%) |
| Jul | 27,1 | 0,48 (1,8%) | 0,45 (1,7%) |
| Ago | 27,5 | 0,91 (3,3%) | 0,84 (3,1%) |
| Set | 28,7 | 0,51 (1,8%) | 0,52 (1,8%) |
| Out | 30,2 | 0,86 (2,8%) | 0,78 (2,6%) |
| Nov | 30,8 | 0,64 (2,1%) | 0,59 (1,9%) |
| Dez | 31,6 | 0,52 (1,7%) | 0,55 (1,7%) |

A variabilidade entre as curvas médias dos anos mostra como a cobertura do céu interferiu na transmissão da radiação de ondas longas atmosférica em Botucatu.

A Figura 10(a) mostra a comparação da LW do modelo experimental dos 6 anos e a medida do ano de 2006 e a Figura 10(b) mostra a LW estimada pela curva polinomial ajustada e a medida do ano de 2006, em função do tempo em mês.

A comparação entre a LW obtida pelo modelo experimental e a medida no ano de 2006 (Figura 8a), mostra que na maioria dos meses, a radiação média mensal medida encontra-se dentro dos desvios da média.

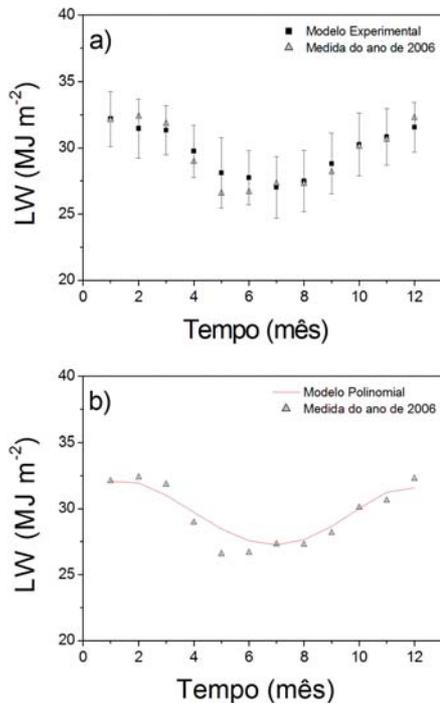


Figura 10.(a) Comparação entre modelo experimental da LW e a medida do ano de 2006; (b) LW estimada pelo modelo polinomial e a medida de 2006.

Apenas nos meses de maio e junho ocorreu superestimativa das medidas experimentais. Nos demais meses, a medida está inserida dentro do intervalo de variação da estimativa. A comparação entre a LW estimada pelo modelo polinomial ajustado e a medida em 2006 (Figura 10b) mostra por meio dos indicativos estatísticos que o modelo polinomial de quinta ordem subestimou a medida em torno de 0,7986%, com espalhamento na ordem de 2,597% e ajustamento de 0,9613.

5. CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos com a base de dados de radiação de ondas longas horária e diária de 6 anos, monitoradas em Botucatu, no período de 2000 a 2006, podemos concluir que: a LW média mensal horária variou no intervalo de 0,8MJ/m² a 1,58MJ/m², com valor médio de 1,238MJ m⁻² e desvio de 11,3% . A radiação LW média mensal diária variou entre 20,76MJ/m² a 35,13MJ/m², com

média total de 29,68 e desvio de 9.5%. Os valores mais elevados de LW ocorreram das estações do verão e primavera, as quais apresentam maiores nebulosidade, temperatura e umidade, enquanto que os menores valores de LW ocorreram do inverno e outono, as quais apresentam condições de clima contrária de nebulosidade, temperatura e umidade. As evoluções da LW média horária e diária apresentaram as mesmas características temporais durante o ciclo anual. Os dois ciclos anual da LW médio mensal acompanharam rigorosamente a evolução da temperatura média dos meses.

Os modelos anuais da LW média mensal horário e diário, obtidos na modelagem são polinomiais de quinta ordem, e, portanto simples e de fácil utilização. Os ajustes apresentaram coeficientes de determinação elevados e próximos de 1, os quais mostram que a LW está bem correlacionada com intervalo de tempo mensal. Os modelos temporais permitem, sem necessidade de medida externa, estimar a irradiação de ondas longas atmosférica com elevada correlação.

Na validação do modelo de estimativa LW horária por meio dos indicativos estatísticos ocorreu superestimativa inferior a 1% (0,95%), espalhamento de 2,71% e elevado índice de ajustamento de 0,96.

Na validação do modelo de estimativa LW diário por meio dos indicativos estatísticos mostrou que o modelo subestimou a medida em torno de 0,6%, com espalhamento na ordem de 2,34% e ajustamento de 0,97.

Agradecimento: À FAPESP, e ao CNPq pelo apoio financeiro.

6. BIBLIOGRAFIA

- Ångström, A. A study of the radiation of the atmosphere., 1918. Smithson. Misc. Collect, **65**, 1-159
- Brunt, D. Notes on radiation in the atmosphere., 1932. Q. J. R. Meteorol. Soc., **58**, 389-420
- Brutsaert, W., 1975. A derivable formula for long-wave radiation from a clear skies. Water Resour., **11**, 742-744.

- Dilley, A.C., O'Brien, D.M., 1998. Estimating downward clear sky long-wave irradiance at the surface from screen temperature and precipitable water. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **124**, 1391-1401
- Codato, G., Oliveira, A.P., Soares, J., Escobedo, J.F., Gomes, E.N., Pai, A.D., 2008. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil. *Theor and Appl Climatol*, **93**, 75-73
- 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. *Appl. Energy*, **86**, 299-309
- Idso, S.B., 1981. On the systematic nature of diurnal patherns of differences between calculation and measurements of clear sky atmospheric thermal radiation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **107**, 737-741, Notes and Correspondence.
- Iqbal, M., 1983. An introduction to solar radiation. Canada: Academic Press, 390 págs.
- Niemelä, S., RÄISÄNEN, P., SAVIJÄRVI, H., 2001. Comparison of surface radiative flux parameterization part I: longwave radiation, *Atmos. Res.*, **58**, 1-18
- Prata, A.J., 1996. A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **122**, 1127-1151.
- Stone, R.J., 1993. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models, *Sol. Energy*, **51**, 289-291.
- Swinbank, W.C., 1963. Long-wave radiation from clear skies. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **110**, 339-348.
- Udo, S.O., 1999. On the relationship between downward infrared sky radiation and clearness index. *Global Journal of Pure and Applied Science.*, **5**, 427-430
- Willmott, C.J., 1982. Some coments on the evaluation of model. *Bull. Amer. Meteoro. Soc.*, **63**, 1309-1313.