

EVOLUÇÃO DIURNO-NOTURNA DA RADIAÇÃO DE ONDA LONGA ATMOSFÉRICA (LW) HORÁRIA EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

João Francisco Escobedo¹

Eduardo Nardini Gomes¹

Alexandre Dal Pai²

Dinival Martins¹

Amauri Pereira de Oliveira³

Jacyra Soares³

Eduardo Wilde Bárbaro³

1 Departamento de Recursos Naturais, FCA, UNESP Campus de 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 apresentada a série diurno/noturna (anual e mensal) da radiação de onda longa (LW) horária, medida no período de 2000 a 2006 em Botucatu/SP/Brasil. A irradiação LW horária em MJ/m² mostrou ser dependente da radiação de ondas curtas SW e das variações de parâmetros meteorológicos da atmosfera local como temperatura, umidade e nebulosidade. Os valores de LW foram mais elevados no verão onde a radiação SW, temperatura, nebulosidade, vapor d'água são mais elevadas do ano, e os menores valores no inverno, condições climáticas contrárias a do verão. A evolução diurno-noturna (anual e mensal) da LW horária apresentou evolução similar a da temperatura do ar (Ta) no ciclo de 24h. As evoluções diurno-noturna da LW geraram equações polinomiais de quinta ordem que estimam a LW em função do tempo (horas), com elevados coeficientes de determinação (R²). O modelo temporal foi validado, comparado as estimativas com a medida de LW, por meio dos indicadores estatísticos MBE e RMSE e indicativo “d” de Willmott.

Palavras Chaves: radiação de onda longa e radiação de onda longa atmosférica.

DIURNAL (24h) EVOLUTIONS OF DOWNWARD ATMOSPHERIC LONGWAVE RADIATION (LW) AT THE SURFACE IN BOTUCATU, SÃO PAULO, BRAZIL.

ABSTRACT: In this work the diurnal (24h) evolutions of downward atmospheric longwave radiation (LW) at the surface is described. They are based on observations carried out in Botucatu, São Paulo, Brazil. The observations indicated that LW is larger during summer when SW radiation, air temperature, cloudiness and water vapor are higher and LW is smaller during winter. The diurnal evolution of LW follows the diurnal evolution of air temperature at the surface. A set of 5th order polynomials were obtained by linear regression fitting that estimate the hourly values of LW as function of time, with large determination coefficient (R²). These polynomial expressions were validated using MBE, RMSE and d-Willmott parameters.

Keywords: longwave radiation, downward atmospheric longwave radiation.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da energia diurno-noturna da radiação de onda longa atmosférica (LW), por meio de medidas (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 ciências térmicas. Do ponto de vista do clima, a LW é importante porque expressa a presença de gases do efeito estufa na atmosfera (e.g. vapor d'água, dióxido de carbono e metano). Na agricultura, os modelos da LW contribuem para métodos de estimativas do balanço de onda longa, por meio do balanço de radiação. Na área da construção civil, o conforto térmico das edificações depende da quantidade de energia térmica trocada pelas superfícies externas dos prédios com o meio ambiente, e na engenharia térmica, os coletores e concentradores solares operam em altas temperaturas e têm consideráveis perdas térmicas porque dependem da quarta potência da temperatura (Sellers, 1965)

Com o propósito de conhecer melhor os níveis horários da energia da LW no dia e noite, bem como conhecer a dependência sazonal em função das variações climáticas como nebulosidade, temperatura, precipitação, umidade e aerossóis, a Estação de Radiometria Solar de Botucatu/SP/Brasil monitora essa radiação desde o ano 2000. O desenvolvimento do estudo é importante porque a atmosfera local recebe todos os anos no período da seca, entre julho e novembro, elevadas concentrações de matérias particuladas devido à queima da cana-de-açúcar.

Assim, o presente trabalho teve por objetivo analisar a sazonalidade da radiação atmosférica de onda longa horária do período de 2000 a 2006 em função dos parâmetros climáticos como radiação global, nebulosidade, umidade, precipitação, e propor e validar um modelo temporal para a

evolução diurno-noturno para estimativa da LW média horária anual e mensal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Clima

O experimento foi realizado na Estação de Radiometria Solar de Botucatu, FCA, UNESP, Botucatu-SP, com coordenadas geográficas: latitude de 22°54' S, longitude de 48°27' W e altitude de 786 m.

O clima 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 23,2C⁰ 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.

A nebulosidade é mais elevada nos meses de janeiro (f=0,61) e menor em agosto (f=0,27). Contrastando a nebulosidade, os meses de maior e menor número de horas de brilho solar ocorrem em agosto e fevereiro com totais de 229h e 175,28h respectivamente. A maior precipitação ocorre no mês de janeiro com total de 260,7mm e a mínima em agosto com 38,2mm.

Botucatu é uma cidade do tipo universitária com 120800 habitantes e esta 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.

As cidades adjacentes (70 cidades dentro de um raio de 150 km) incluindo aquelas cidades que tem medidas de material particulado (Limeira e Santa Gertrudes) totalizam aproximadamente 36 milhões de toneladas de cana-de-açúcar de rendimento por ano, extensão excedente cerca de 10% do total de área (Codato et al., 2008). Portanto, ao redor de Botucatu, esta é uma significativa

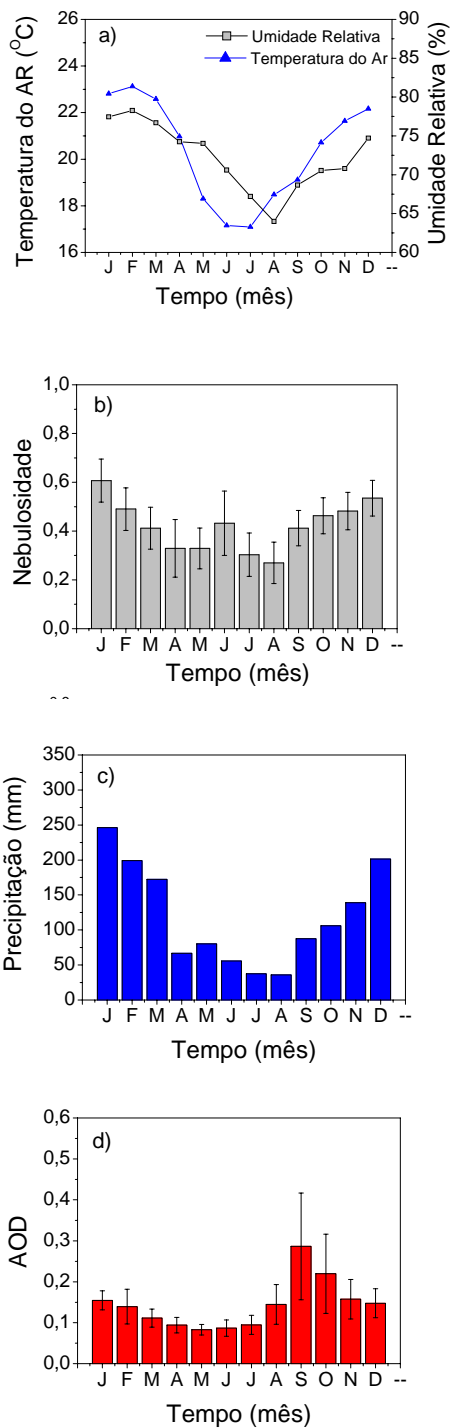


Figura 1. Séries Climáticas: a) temperatura e Umidade, b) Nebulosidade, c) Precipitação, d) Series de 10 anos de aerossóis em Botucatu.

contribuição da poluição do ar pela queimada da biomassa.

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 $70,0 \mu g.m^{-3}$ (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 $20,0 \mu g.m^{-3}$ 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.

2.2 Instrumentação

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

O pirgeômetro modelo CG1 da Kipp & Zonen, é um instrumento de monitoramento padrão da radiação LW, ao nível de superfície, recomendado pela World Climate Research Program Baseline Surface Radiation Network. O detector térmico é protegido por uma janela de silício que é internamente revestida por uma película que evita a chegada da radiação solar ao detector térmico. O aquecimento da janela de silício, provocado pela radiação solar, faz a temperatura da janela ficar superior à temperatura da termopilha, e 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 foi aplicada 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, com fator de calibração igual a $8,13 \mu V W^{-1} m^2$. 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 calculada 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. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

3.1 Evolução da radiação LW horária

A figura 2 mostra a evolução temporal da radiação de ondas longas LW horária correspondente a uma fração (2000 a 2004) do período de 2000 a 2006, com total de 60386 observações.

O ciclo anual da LW é periódico e as variações sazonais são resultantes das variações astronômica (dia) e geográfica (local) da radiação de onda curta SW, e conseqüentemente, das variações dos parâmetros meteorológicos como temperatura, nebulosidade, vapor d'agua. Os maiores valores de LW ocorreram no verão, onde a radiação de ondas curtas SW, temperatura, nebulosidade, precipitação e umidade, foram mais elevadas, e são menores no inverno, onde as condições climáticas são contrárias as do verão, ou seja a temperatura, nebulosidade, precipitação e umidade, menos elevadas no ano. O valor máximo da radiação LW foi igual a $1,58 MJ/m^2$ e a mínima de $0,8 MJ/m^2$. O valor médio da LW horária dos 6 anos foi de $1,238 MJ m^{-2}$ com desvio de 11,3%.

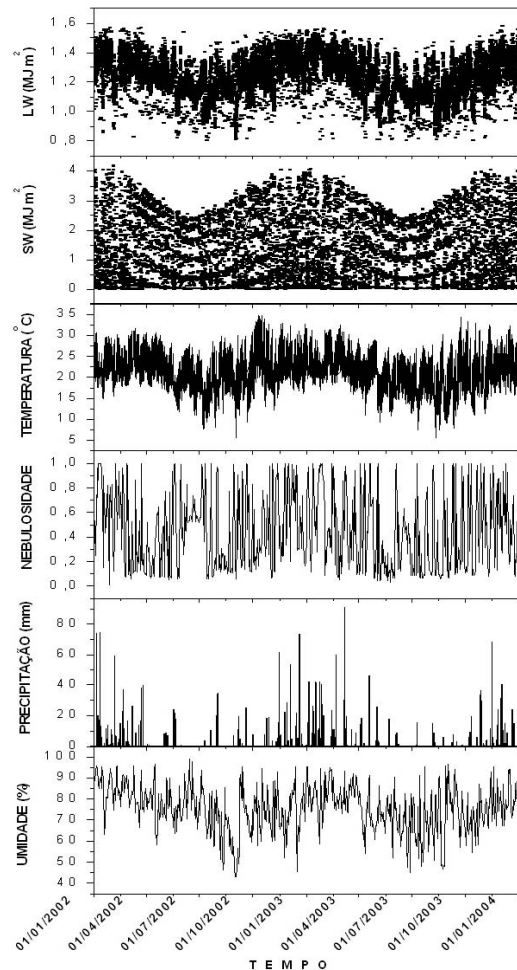


Figura 2. Evolução temporal da radiação de ondas longa horária LW, radiação de onda curta (SW), temperatura, nebulosidade, precipitação, umidade para o período de 2002 a 2004 em Botucatu.

3.2 Distribuição de Frequência da Radiação LW Diurno/ Noturna.

A figura 3 mostra o histograma de frequência da LW horária para o ciclo diurno/noturno e para o ciclo diurno, em função da variação LW entre $0,80 MJ/m^2$ a $1,58 MJ/m^2$.

Para o ciclo diurno/noturno, o intervalo de variação de LW com a maior de frequência de ocorrência (3235) é bastante amplo, 50.0% das observações situaram entre os valores $1,15 MJ/m^2$ e $1,35 MJ/m^2$. A distribuição da LW no ciclo diurno/noturno é do tipo normal, com valor médio igual a $1,24 MJ/m^2$. A figura

3 mostra ainda que, a maior contribuição na frequência de ocorrência das radiações LW com valores entre 0.81MJ/m^2 até o valor de 1.2MJ/m^2 pertencem ao período noturno, enquanto que, a maior contribuição de 1.2MJ/m^2 a $1,58\text{MJ/m}^2$, é do período diurno.

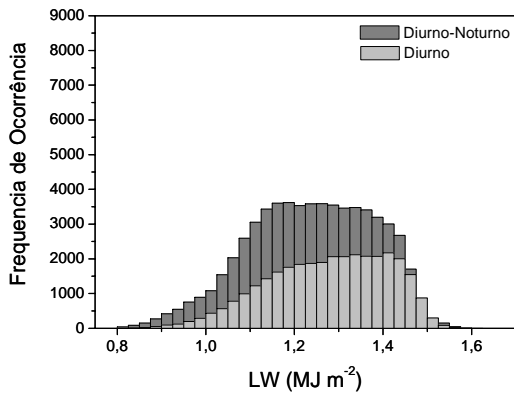


Figura 3. Histograma de frequência da LW média horária (24 horas).

3.3. Radiação LW Média Horária Anual

3.3.1 Evolução Diurno/ Noturna da LW Média Horária Anual

A figura 4 mostra: a) a evolução da LW diurno/noturno para cada ano de 2000 a 2005; b) a evolução média da LW entre os valores médios dos anos com os desvios da média; c) a evolução da LW média horária anual total e desvios das médias (modelo experimental); d) a evolução diurno/noturna da temperatura do ar média mensal.

A evolução diurno/noturna da LW em cada ano (fig4a) é característica e similar entre os anos. A radiação LW decresce do início do ciclo a meia noite até o sol nascer, as 6:00h onde atinge o valor mínimo. Posteriormente, os valores de LW crescem até atingir o valor máximo em torno das 14:30h e decrescendo a seguir continuamente até as 24:00h.

A evolução o diurno/noturno médio anual da LW entre os anos (fig4b) mostra que o ciclo iniciou as 00:05h com a radiação LW decrescendo continuamente do valor

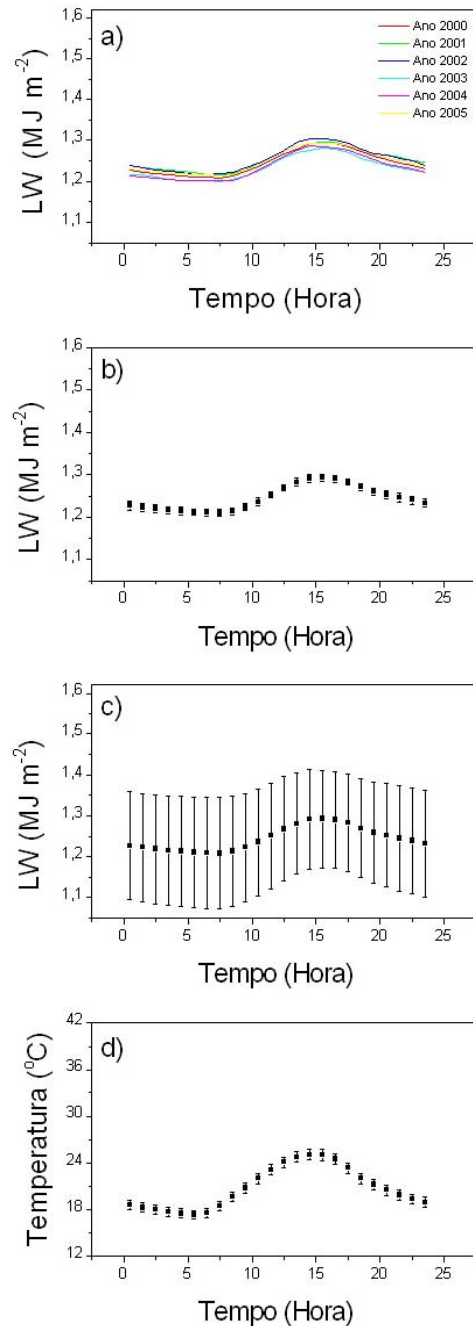


Figura 4. a) Evolução diurno/noturno da LW média horária dos 6 anos (2000 a 2005) em função das horas do dia; b) a evolução média da LW entre os valores médios dos anos, com os desvios da média; c) a evolução da LW média horária total e desvios das médias (modelo experimental); d) evolução diurno/noturna da temperatura média mensal do ar.

1,228MJ/m² até as 6:30h, onde atingiu o valor mínimo de 1,210 MJ/m² no nascer do sol e na condição de menor temperatura do dia, finalizando a primeira parte do ciclo noturno. Na fase diurna, a radiação LW cresceu gradativamente das 6:30h até as 15:30h onde passou por um valor máximo igual a 1,293 MJ/m² na temperatura mais elevada do dia, e em seguida decresceu continuamente até as 24:00h, terminando o ciclo diurno as 18:00h com LW igual a 1,27MJ/m². O final do ciclo noturno foi concluído às 24:00h, com LW igual a 1,23MJ/m².

Os valores dos desvios médios de LW entre os valores médios dos anos, mostrados na figura 4b, foram inferiores a 1,0% em todos os intervalos horários.

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 na atmosfera; 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.

A evolução da LW média horária total e desvios das médias (modelo experimental) são mostrados na figura 4c. A evolução dos valores médios de LW é quase igual aos da figura 4b a menos dos valores dos desvios da média. Evidentemente que os desvios da média da fig.4c são maiores porque estes desvios expressam a variabilidade de LW total durante os anos e não a variabilidade de LW médios entre os anos. Os desvios variaram entre 11,0% a 13,0%, onde os maiores valores pertencem ao período noturno e os menores no diurno.

A curva experimental de LW da figura 4c foi submetida a uma análise de regressão polinomial entre LW e tempo (T) em horas.

A curva obtida, a qual denominará por modelo temporal ou modelo experimental, que apresentou o melhor ajuste foi um polinômio de quinto grau e com coeficiente de determinação R²=0,98297.

$$LW=1,219+0,015T-0,007T^2+0,001T^3-5,598E-5T^4+9,711E-7T^5$$

O resultado indica que a radiação LW está muito bem correlacionada com o tempo (T) em horas, como mostra coeficiente de determinação próximo a 1.

3.3.2 Validação do Modelo da LW Média Horária Anual

Para a validação do modelo temporal (experimental e estatístico), as radiações médias horárias LW estimativas pelo modelo experimental (médias e desvios) e pelo modelo estatístico temporal (curva de regressão polinomial), foram comparadas com a medida LW do ano de 2006, como mostrado na figura 5:

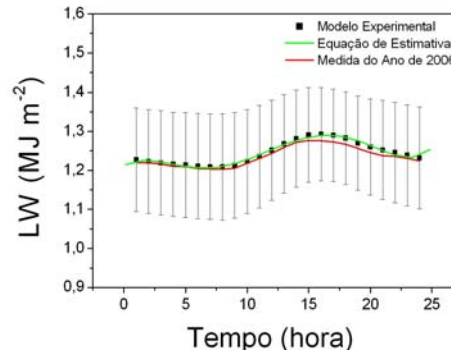


Figura 5. Estimativa diurno/noturno da LW média horária: (a) Modelo Experimental (b) modelo estatístico polinomial, comparados a medida diurno/noturno da LW média horária do ano de 2006.

A comparação mostra que a medida se enquadrou nos intervalos de variação da LW. Portanto houve uma concordância de 100% entre a estimativa e a medida. Em relação ao valor médio de LW apenas no intervalo das 13:00h até as 20:00h, o valor médio LW

superestimou ligeiramente a medida. Nos demais horários do ciclo novamente houve concordância entre o valor médio do modelo experimental e a medida.

A comparação da estimativa LW modelo estatístico (equação de regressão polinomial) com a medida de LW em 2006 (figura 5b) confirma o desempenho do modelo em todos os intervalos horários no ciclo diurno/noturno. Os resultados estatísticos dos indicativos MBE, RMSE e “d” de Willmott obtidos da comparação entre o modelo polinomial e a medida estão apresentadas na tabela 3.

Tabela3. Validação modelo experimental e medida.

Modelo	MBE(%)	RMSE(%)	d
Anual	0,05948	0,66485	0,97334

Os valores dos indicativos estatísticos MBE e RMSE em percentagem são baixos e inferiores a 1,0%. Os resultados indicam o bom desempenho estatístico do modelo na estimativa da LW. Mesmo com uma base de dados de LW horária curta (7 anos), o modelo temporal ou experimental horário pode ser utilizada na estimativa de LW na evolução diurno-noturno com vantagens por não necessitar de outras medidas meteorológicas. O indicativo de ajustamento “d” de Willmott obtido, superior a 0,9733 expressa o bom nível estatístico de exatidão entre a medida e a estimativa da equação temporal.

3.4 Radiação LW Média Horária dos Meses

3.4.1 Evolução Diurno/Noturna da LW Média Horária dos Meses

A tabela 4 mostra nas colunas, a evolução diurno-noturna da LW média horária para todos os meses do ano em função dos intervalos horários. Os desvios da LW médio representam variação da LW de cada mês e são da ordem de grandeza de 11,0%.

Comparando os valores de LW nas colunas em todos os intervalos horários das 00:00h as 24:00h pode se observar que os valores de

LW decrescem na seqüência de janeiro a julho e crescem de julho a dezembro, exatamente como as variações mensais de parâmetros meteorológicos local. Há uma tendência evidente que a radiação LW é maior nos meses nos quais a temperatura, umidade e nebulosidade são mais elevadas no ano, e menor nos meses nos quais a temperatura, umidade e nebulosidade são menos elevadas no ano (figura 2).

Nas evoluções mensais representadas pelas colunas da tabela 4, o valor de LW máximo ocorre no intervalo horário das 14:30h e 15:30h, onde a temperatura média mensal é a mais elevada do mês. Na grande maioria dos meses o valor máximo de LW são iguais nos dois horários. Nos meses de fevereiro, agosto e setembro, o horário das 15:30h LW é pouco mais elevada, enquanto que, o horário das 14:30h é pouco mais elevada no mês de novembro. Já o valor de LW mínimo ocorre quase que igualmente em todos os meses nos intervalos das 05:30h, 06:30h e 07:30h, com pequenas diferenças entre um mês a outro. Os valores máximos e mínimos de LW também decrescem no sentido de janeiro a julho e crescem de julho a dezembro, seguindo as evoluções das temperaturas máximas e mínimas mensais.

A partir dos valores de LW representados nas colunas da tabela 4 obteve-se as evoluções diurno-noturna da média horária mensal da LW as quais estão mostradas nas figuras 6 (a e b), com seus respectivos desvios da média. As evoluções diurno/noturna da LW dos meses são similares da evolução diurno/noturna anual mostrada na seção anterior. Durante o ciclo das 24h, as radiações LW decresceram das 00:00h até atingir o valor mínimo, horário nascente do sol e temperatura mínima entre 5:30h as 7:30h dependendo do mês, cresceram até por volta das 14:30h as 15:30h onde passaram por um valor máximo no horário da temperatura máxima, e decresceram posteriormente continuamente até as 24:00h. Os desvios expressam as variações de LW nos meses. Os maiores desvios da LW entre 8,0% a 12,0% foram no período que compreende as primeiras horas do até

Tabela 4. Evolução diurno-noturna da radiação LW média horária dos meses ($MJ m^{-2}$).

Hora	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
0,5	1,34±0,11	1,30±0,11	1,29±0,11	1,23±0,10	1,15±0,12	1,15±0,11	1,12±0,12	1,14±0,11	1,19±0,12	1,25±0,12	1,27±0,11	1,30±0,11
1,5	1,33±0,11	1,30±0,11	1,29±0,10	1,22±0,10	1,15±0,13	1,15±0,10	1,11±0,11	1,13±0,12	1,19±0,12	1,25±0,12	1,27±0,11	1,30±0,11
2,5	1,33±0,11	1,30±0,11	1,28±0,10	1,22±0,10	1,15±0,13	1,15±0,10	1,11±0,12	1,13±0,12	1,18±0,12	1,25±0,12	1,26±0,11	1,29±0,11
3,5	1,32±0,11	1,29±0,11	1,28±0,11	1,21±0,10	1,15±0,13	1,14±0,10	1,10±0,11	1,13±0,12	1,18±0,12	1,24±0,13	1,26±0,11	1,29±0,11
4,5	1,32±0,11	1,29±0,11	1,28±0,11	1,21±0,10	1,15±0,13	1,14±0,10	1,10±0,11	1,13±0,12	1,18±0,12	1,23±0,13	1,25±0,12	1,29±0,11
5,5	1,32±0,11	1,29±0,11	1,28±0,11	1,21±0,10	1,15±0,13	1,14±0,10	1,10±0,12	1,12±0,12	1,17±0,12	1,23±0,13	1,25±0,12	1,28±0,11
6,5	1,32±0,11	1,29±0,11	1,28±0,11	1,21±0,10	1,15±0,13	1,14±0,10	1,10±0,12	1,12±0,12	1,17±0,12	1,23±0,13	1,24±0,12	1,29±0,12
7,5	1,32±0,11	1,28±0,11	1,28±0,11	1,21±0,10	1,15±0,14	1,14±0,11	1,11±0,12	1,12±0,12	1,16±0,12	1,23±0,12	1,25±0,12	1,29±0,12
8,5	1,32±0,11	1,29±0,11	1,28±0,10	1,22±0,10	1,15±0,14	1,14±0,10	1,10±0,12	1,12±0,12	1,17±0,11	1,23±0,12	1,26±0,12	1,29±0,11
9,5	1,34±0,10	1,31±0,10	1,29±0,09	1,22±0,10	1,16±0,14	1,14±0,10	1,11±0,12	1,12±0,12	1,18±0,11	1,24±0,11	1,27±0,11	1,30±0,10
10,5	1,35±0,09	1,32±0,10	1,30±0,09	1,24±0,10	1,17±0,13	1,15±0,10	1,12±0,12	1,13±0,12	1,19±0,11	1,26±0,10	1,29±0,11	1,32±0,10
11,5	1,37±0,08	1,33±0,09	1,32±0,09	1,25±0,09	1,18±0,12	1,16±0,10	1,13±0,11	1,15±0,11	1,21±0,10	1,28±0,10	1,30±0,10	1,34±0,09
12,5	1,38±0,08	1,34±0,09	1,34±0,08	1,27±0,09	1,20±0,12	1,18±0,09	1,15±0,11	1,16±0,11	1,23±0,10	1,30±0,10	1,33±0,10	1,36±0,08
13,5	1,39±0,07	1,36±0,08	1,35±0,08	1,29±0,09	1,21±0,12	1,19±0,09	1,16±0,11	1,18±0,10	1,25±0,10	1,32±0,11	1,34±0,09	1,37±0,08
14,5	1,39±0,07	1,36±0,07	1,36±0,07	1,30±0,09	1,22±0,12	1,20±0,09	1,17±0,11	1,19±0,11	1,26±0,10	1,33±0,10	1,35±0,09	1,37±0,08
15,5	1,39±0,07	1,37±0,08	1,36±0,07	1,30±0,09	1,22±0,12	1,20±0,09	1,17±0,11	1,20±0,10	1,27±0,10	1,33±0,10	1,34±0,08	1,37±0,08
16,5	1,39±0,07	1,37±0,08	1,35±0,07	1,30±0,09	1,22±0,12	1,20±0,09	1,17±0,10	1,20±0,10	1,26±0,09	1,32±0,10	1,34±0,09	1,36±0,08
17,5	1,39±0,07	1,36±0,08	1,35±0,08	1,29±0,09	1,21±0,12	1,19±0,09	1,17±0,11	1,19±0,10	1,26±0,10	1,31±0,10	1,33±0,10	1,35±0,08
18,5	1,37±0,07	1,35±0,08	1,34±0,08	1,28±0,09	1,20±0,12	1,18±0,09	1,16±0,11	1,18±0,10	1,24±0,10	1,30±0,10	1,32±0,10	1,35±0,09
19,5	1,36±0,08	1,34±0,09	1,33±0,09	1,27±0,09	1,19±0,12	1,18±0,10	1,15±0,11	1,17±0,10	1,23±0,11	1,28±0,11	1,30±0,11	1,34±0,09
20,5	1,36±0,08	1,33±0,10	1,32±0,09	1,26±0,09	1,18±0,12	1,17±0,10	1,14±0,11	1,16±0,10	1,22±0,11	1,27±0,11	1,29±0,11	1,33±0,09
21,5	1,36±0,09	1,32±0,10	1,31±0,09	1,25±0,09	1,18±0,12	1,17±0,10	1,13±0,11	1,16±0,11	1,21±0,11	1,27±0,12	1,28±0,11	1,33±0,10
22,5	1,35±0,10	1,32±0,11	1,30±0,10	1,24±0,10	1,17±0,12	1,16±0,10	1,13±0,11	1,15±0,11	1,20±0,11	1,27±0,12	1,28±0,11	1,32±0,10
23,5	1,34±0,10	1,31±0,11	1,30±0,10	1,23±0,10	1,16±0,12	1,16±0,10	1,13±0,12	1,14±0,11	1,19±0,11	1,26±0,12	1,27±0,12	1,30±0,11

aproximadamente 10:00h, em todos os meses do ano. No período das 10:00h até as 19:00h os desvios são os menores da evolução mensal, e variam entre 5,0% a 10,0%. A partir das 10:00h até as 24:00h os desvios aumentam novamente entre 7,0% a 11,0%.

O desvio médio diário variou de 6,9% em janeiro a 10,75 em maio. Os valores mais elevados ocorreram nos meses mais secos e baixa nebulosidade como maio (10,7%), julho (10,0%), agosto (9,7%), setembro (9,1%), outubro e junho (8,9%), enquanto que , os desvios menos elevados, ocorreram no período chuvoso: janeiro (6,9%), fevereiro e março (7,2%), Abril e dezembro (7,5%).

Similarmente, a curva da LW média horária anual total e desvios das médias (modelo experimental) mostrada na figura 4c, a curva ajustada por regressão polinomial em cada mês representa o modelo temporal ou experimental mensal para estimar a LW horária mensal em função do tempo em horas. Na tabela 5 são apresentados os

coeficientes dos polinômios e os coeficientes de determinação das correlações.

Os ajustes das equações de quinta ordem foram estatisticamente positivos, tendo em vista que, os coeficientes de determinação (R^2) variaram entre os valores de 0,9857 em maio a 0,9580 em dezembro. Os resultados mostram que a LW média horária mensal está muito bem correlacionada no tempo horário, durante o dia e noite.

Os ajustes foram melhores na seqüência para os meses: maio, abril, fevereiro, julho e março cujos coeficientes de determinação (R^2) em torno de 0,9800 foram pouco superiores aos dos meses de janeiro, junho, agosto setembro, outubro, novembro e dezembro. Os elevados coeficientes de determinação (R^2) mostram que as equações da série temporal mensal podem ser utilizadas nas estimativas da LW media horária em Botucatu ou em outros locais com clima similar

Tabela5: Coeficientes dos polinômios e os coeficientes de determinação das correlações.

Mês	$LW = \sum_{i=0}^5 a_i t^i, (t = 0,5;1,5;2,5;3,5;....23,5)$						R^2
	a0	a1	a2	a3	a4	a5	
Janeiro	1,3363	4,10541 E-4*	-0,0034	6,65019E-4	-3,88981E-5	7,13837E-7	0,97784
Fevereiro	1,2982	0,0091	-0,0057	8,93397E-4	-4,843873E-5	8,54934E-7	0,98057
Março	1,2872	0,00896	-0,00567	8,93354E-4	-4,85512E-5	8,5781E-7	0,98015
Abril	1,21926	0,0115	-0,00672	0,00102	-5,43203E-5	9,4268E-7	0,98247
Maio	1,14655	0,01407	-0,00632	9,02169E-4	-4,70182E-5	8,11018E-7	0,98567
Junho	1,14449	0,01155	-0,00573	8,06482E-4	-4,13405E-5	7,04438E-7	0,963
Julho	1,11196	0,01058	-0,00593	8,73591E-4	-4,57996E-5	7,91224E-7	0,98065
Agosto	1,12367	0,02082	-0,00879	0,00115	-5,68923E-5	9,43413E-7	0,97173
Setembro	1,17752	0,02566	-0,01154	0,00156	-7,91483E-5	1,34399E-6	0,97621
Outubro	1,2398	0,02179	-0,0107	0,00153	-8,00003E-5	1,39567E-6	0,9686
Novembro	1,26383	0,01163	-0,00749	0,00119	-6,52755E-5	1,16933E-6	0,97861
Dezembro	1,29921	0,00469	-0,00461	8,11149E-4	-4,61327E-5	8,36588E-7*	0,95795

3.4.2 Validação do Modelo da LW Mensal

A figura 9 mostra a validação do modelo mensal, comparação do modelo experimental mensal da LW e a medida da ano de 2006. O resultado mostra que o modelo mensal da LW apresentou bom desempenho na estimativa de LW em todos os meses. A medida se

enquadrou dentro do intervalo de variação do valor médio do modelo experimental, estimando corretamente o valor de LW durante o ciclo dia e noite.

Comparando o valor médio de LW do modelo experimental pode-se verificar que a estimativa foi aproximadamente igual a

medida da LW nos meses de: janeiro, fevereiro, março, julho, agosto, outubro e

novembro. Nos meses de abril, maio, junho e setembro, o valor médio do modelo

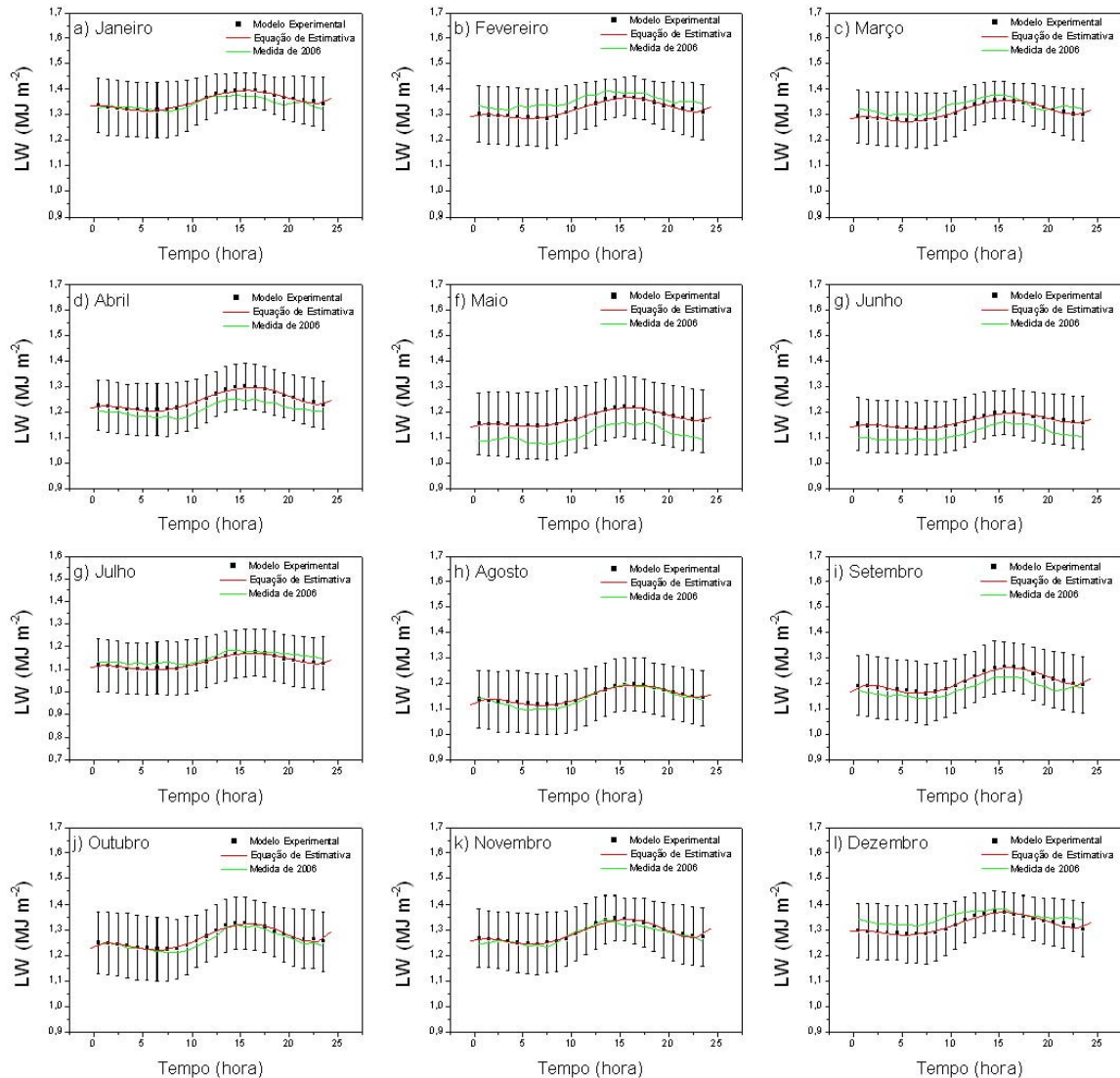


Figura 8. Evoluções da LW média horária dos meses: janeiro a dezembro, e os ajustes das equações de regressão polinomial nas evoluções diurnas médias horárias da LW dos meses.

experimental superestimou as medidas, enquanto que, em fevereiro e dezembro, subestimou, todo intervalo horário diurno e noturno.

A comparação entre o modelo mensal e a medida mensais também foi analisada em função indicativos estatísticos MBE, RMSE e “d” de Willmott. Os resultados estatísticos

dos indicativos MBE, RMSE e “d” de Willmott obtidos da comparação são mostradas na figura 10. 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.

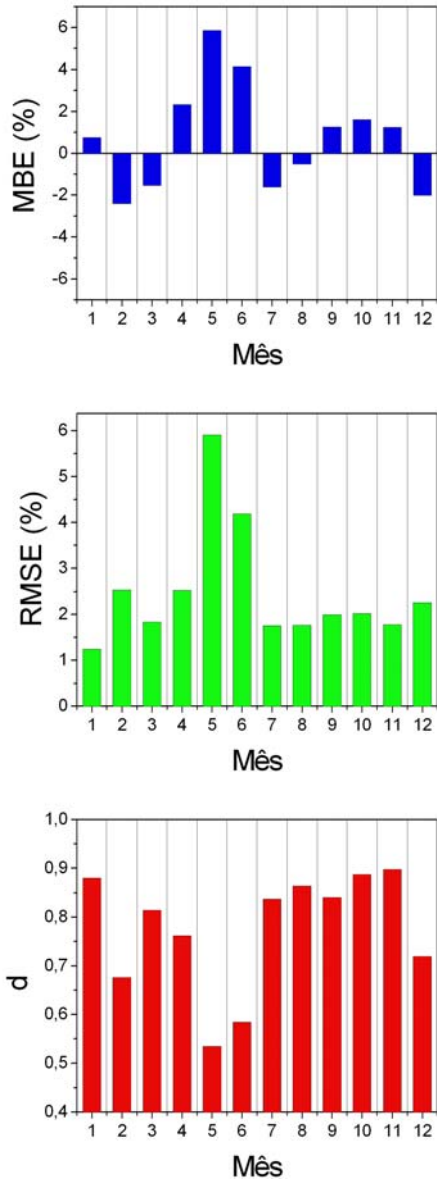


Figura 10. Resultados estatísticos dos indicadores MBE, RMSE e “d” de Willmott obtidos da comparação entre os modelos e as medidas.

O indicativo MBE representa o desvio das médias e provê informações quanto ao desempenho do modelo em longo prazo. 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. Há um equilíbrio entre a superestimativa e a subestimativas do modelo.

Os resultados comparativos entre modelo e medidas mensais comprovam a variação dos valores de LW estimados e medidos em cada mês do ano. Os valores de MBE mostra que em alguns meses modelo polinomial superestimou a medida, em outros a medida superestima o modelo. Fica evidente, no entanto, pelos valores dos indicativos estatísticos, que os meses de maio e junho apresentaram os piores resultados na combinação dos indicativos estatísticos MBE, RMSE e d de Willmott. Nos meses de janeiro, abril, maio, junho, setembro e novembro o modelo superestimou a medida, enquanto nos meses fevereiro, março, julho, agosto, outubro e dezembro subestimou a medida. Os valores de MBE variaram mês a mês, sendo que os maiores desvio da média foi inferior a 6,0% e o menor na ordem de -0,2%. A grande maioria dos desvios foram inferiores a 3,0%. Esses resultados foram considerados positivos estatisticamente, pois são da mesma ordem de grandeza dos erros experimentais. O RMSE é a raiz quadrada do erro quadrático médio e informa sobre o valor real do erro produzido pelo modelo. Quanto mais ajustado é o modelo da medida, menor é o valor de RMSE. Os resultados obtidos para esse indicativo inferior a 6,0% mostram que o modelo é eficiente e expressam a concordância entre a estimativa do modelo e a medida. Os menores erros pelo modelo foram na seqüência dos meses: janeiro, agosto, março, julho, abril, novembro, dezembro, fevereiro, setembro, outubro, junho e maio, respectivamente. O índice de ajustamento “d” variando de 0 a 1 representa o total desajustamento e ajustamento, entre a estimativa e a medida (Willmott 1982). Os resultados obtidos para esse indicativo foram satisfatórios estatisticamente, pois na grande maioria dos meses (janeiro, março, abril, julho, agosto e novembro) o valor do indicativo d foi superior a 0,75.

4. CONCLUSÕES

O ciclo anual da LW é periódico e a sazonalidade é resultante das variações astronômica (dia) e geográfica (local) da radiação de onda curta SW, e conseqüentemente, das variações climáticas. Os maiores valores de LW ocorrem no verão, onde a temperatura, nebulosidade, precipitação e umidade, são mais elevadas do ano, e são menores no inverno, onde as condições climáticas são contrárias as do verão.

O ciclo diurno/noturna médio anual e mensal da LW horária acompanhou ao ciclo da temperatura do ar. O ciclo da LW atingiu o menor valor antes do nascer do sol e nas condições de menor temperatura do dia, e passou por um valor máximo nas condições de temperatura mais elevada do dia. O modelo temporal obtido por meio de regressão polinomial entre LW e tempo (T) em horas, nas evoluções diurno/ noturna médio anual e nas mensais apresentaram melhores ajustes para equações de quinto grau e com coeficiente de determinação elevados próximo de 1. Os resultados indicam que a radiação LW está muito bem correlacionada com o tempo (T) em horas. Os valores dos indicativos estatísticos MBE e RMSE em percentagem obtidas na validação dos modelos indicam o bom desempenho estatístico do modelo na estimativa da LW.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Ångström, A., 1918. A study of the radiation of the atmosphere. *Smithson. Misc. Collect.* **65**, p. 1-159
- Brunt, D., 1932. Notes on radiation in the atmosphere. *Q. J. R. Meteorol. Soc* **58**, p. 389-420
- Brutsaert, W., 1975. A derivable formula for long-wave radiation from a clear skies. *Water resour.* **11**, p. 742-744
- 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, theoretical and applied climatology, **93** pag. 57-73
- 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**, p. 1391-1401
- 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**, n. 453, p. 737-741
- Niemelä, S., Räisänen, P. Savijärvi, H., 2001. Comparison of surface radiative flux parameterization part i: longwave radiation, *atmos. Res.* **58**, p. 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**, p. 1127-1151
- Sellers, W.D., 1965 *physical climatology*, chicao: university of chicao press, 272 p.
- Stone, R.J., 1993. improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models, *solar energy.* **51**, n. 4, p. 289-291
- Swinbank, W.C., 1963. long-wave radiation from clear skies. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **110**, P. 339-348
- Willmott, C.J., 1982. some coments on the evaluation of model. *Bull. Amer. Meteoro. Soc.* **63**, p. 1309-1313