

EQUAÇÃO DE ESTIMATIVA DA RADIAÇÃO ATMOSFÉRICA (LW) EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE CLARIDADE Kt EM BOTUCATU/SP/BRASIL.

João Francisco Escobedo – escobedo@fca.unesp.br

Eduardo Nardini Gomes – engomes@fca.unesp.br

Thiago N.S. de Almeida – almeida.tns@fca.unesp.br

Departamento de Recursos Naturais/Ciência Ambiental – FCA/UNESP/Botucatu/SP/Brasil

Alexandre Dal Pai – adalpai@fatecbt.edu.br

Faculdade de Tecnologia (FATEC) - Botucatu/SP/Brasil

Resumo. No trabalho é apresentada uma análise estatística e climática das radiações de onda longa atmosférica (LW) e de onda curta global (G), medidas no período de 2000 a 2006 em Botucatu/SP/Brasil. É descrito também a obtenção e a validação de um modelo de estimativa anual, sazonal e mensal, entre LW e a G, por meio do índice de claridade Kt (G/H_o , onde H_o é a radiação extraterrestre). A amplitude de variação de LW foi proporcional a variação sazonal da radiação global e dos elementos de clima: temperatura, nebulosidade e vapor d'água, da atmosfera. Os maiores valores de LW ocorreram no verão, período úmido, onde G e os elementos climáticos são mais elevados no ano. Os valores de LW foram menores no inverno, condições de G e clima, contrárias do verão. O modelo de estimativa anual, sazonal e mensal da LW obtida em função de G foi do tipo linear: $LW = a - b Kt$ com elevado coeficiente de determinação. O fator de intercepto **a** da equação representa o valor máximo da radiação LW, emissão da atmosfera do período noturno, enquanto que **b** expressa a taxa de decréscimo da LW em função da variação da cobertura de céu desde nebuloso a sem nuvens. O modelo foi validado, comparando-se a LW estimada com a LW medida (do ano de 2006), por meio dos indicadores estatísticos MBE e RMSE. Para o modelo anual, os valores obtidos para MBE e RMSE foram de 2.5% e 9.9% respectivamente. Para o modelo sazonal, os valores de MBE obtidos foram: verão -4.0%, outono 4.6%, inverno 2.8% e primavera 2.3%, enquanto que, os valores de RMSE foram: 6.7% no verão, 10.2% no outono, 8.8% no inverno e 9.4% no outono, e para o modelo mensal, os valores de MBE variaram de 0.2% em julho a 3,8% em setembro, e os valores de RMSE variaram de 5,2% no mês de fevereiro até 10.3% em maio.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da radiação de onda longa atmosférica (LW), por meio de medida (série temporal) ou por modelo de estimativa é importante para estudo climático, balanço de energia em superfície e ciência térmica. Na agricultura, os modelos da LW contribuem para métodos de estimativas do balanço de energia por meio do saldo de radiação total (SR), dado pela relação das radiações de ondas curtas (G) e longas (LW) na superfície terrestre como:

$$SR = G - R + LW - LWt \quad (1)$$

onde G é a radiação global; R é a radiação refletida na superfície terrestre; LW é a radiação emitida pela atmosférica e LWt a radiação emitida pela superfície terrestre.

As radiações de ondas curtas G e R ou saldo de radiação de ondas curtas $SR_{oc} = (G - R)$, em função do grande número de aplicações com radiação solar em processos de conversão térmica, fotovoltaico e produção de biomassa, são muito mais estudadas e conhecidas, que as radiações de ondas longas LW e LWt ou o saldo de radiação de ondas longas $SR_{ol} = (LW - LWt)$. As estações meteorológicas medem de rotina as radiações G -R, enquanto que o monitoramento de LW e LWt é realizado em projetos específicos, onde a limitação está associada, na maioria vezes, aos custos elevados dos equipamentos de medida.

Muitos pesquisadores têm buscado métodos alternativos para conhecer as radiações LW em função de outras variáveis meteorológicas por meio de equações de estimativa. O trabalho de Ångström (1918) relacionou a LW com a pressão de vapor d'água. A partir deste trabalho, surgiram muitas parametrizações envolvendo a LW com a pressão de vapor d'água (Brunt 1932), com a temperatura (Swinbank 1963), e principalmente como função da temperatura e da pressão de vapor d'água (Brutsaert, 1975; Satterlund, 1979; Idso, 1981; Prata, 1996; Dilley e O'Brien, 1998, Niemelä 2001, e Bárbaro et al 2009). Os modelos empíricos clássicos citados funcionam bem em casos de céu aberto, e especialmente em condições climáticas similares ao qual foi gerado, porém, em condições de céu nebuloso, o desempenho do modelo é severamente afetado, a menos que alguma correção com base nas nuvens seja feita (Niemelä et al 2001).

Um modelo alternativo para a estimativa da LW foi sugerido por Ineichen et al. (1984), Sridar & Elliot (2002) e Udo (1999) em função do índice de claridade Kt. O índice de claridade Kt é um indicador geral dos processos de absorção e espalhamento, por nuvens, aerossóis e vapor d'água, que intervêm na transmissão da G através da atmosfera, por meio da relação $K_T = G/H_o$ na superfície terrestre. Este modelo é mais simples, no entanto ele perde muito de sua eficiência quando K_T é grande. UDO (1999) propôs um modelo linear que relaciona média mensal da irradiação diária LW e a média mensal do índice de claridade diário.

Com o propósito de conhecer melhor a relação entre as radiações LW e G, o presente trabalho teve por objetivo analisar estatística e climaticamente a relação das duas radiações monitoradas no período de 2000 a 2006 em Botucatu, em função dos parâmetros climáticos como nebulosidade, umidade e aerossóis; propor um modelo de estimativa entre LW e G, com uma base de dados de 2000 a 2005 e validar o modelo para uma base de dados independente do ano de 2006.

2. METODOLOGIA

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 23,2 °C e 17,1 °C, enquanto que fevereiro e agosto são os meses mais e o menos úmidos, com percentuais de 78,2% e 61,80% respectivamente. 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.

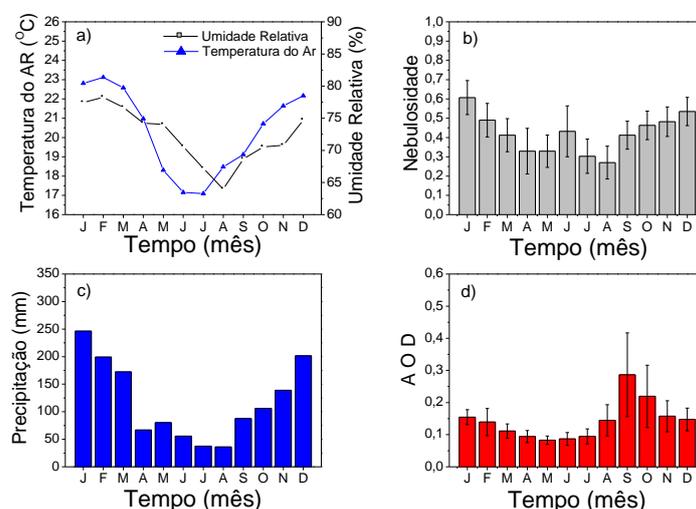


Figura 1 - Série da temperatura, Umidade, Nebulosidade, Precipitação e Aerossóis em Botucatu.

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. 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 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 TERRA do período de 2000 a 2005 (Fig. 1d), mostra que do início das queimadas da cana-de-açúcar em julho, a concentração de aerossóis mensal aumenta consideravelmente passando por um valor máximo de $AOD=0.35$ em setembro, o que é equivalente a concentração PM_{10} de 70.0 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 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.

2.2 Instrumentação

A medida da irradiância atmosférica LW foi realizada através de um pirgeômetro, modelo CG1 da Kipp & Zonen com sensibilidade na faixa de comprimento de onda de 5 a 50 μm e o fator de calibração de $10,75 \text{ } \mu\text{W}^{-1} \text{ m}^2$. O detector térmico é protegido por uma janela de silício 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, gerando um sinal espúrio que deve ser eliminado. Segundo os manuais da Kipp & Zonen, para cada 1000

$W\ m^{-2}$ de radiação solar global perpendicularmente incidente na janela plana do pirgeômetro, são gerados $25\ W\ m^{-2}$ de onda longa. Portanto uma correção foi aplicada pela expressão:

$$LW = LW_{obs} - 0,025I_g \quad (2)$$

Onde: LW_{obs} é a média de 5 minutos da irradiância de onda longa registrada e I_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 $8,13\ \mu V\ W^{-1}\ m^2$. 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 Análise das Radiações LW e G Horária

A Fig. 2 mostra a evolução temporal da radiação de ondas longas LW horária e da radiação de ondas curtas SW ou G, e os parâmetros climáticos temperatura, nebulosidade, precipitação e umidade, apenas do período de 2002 a 2003 para melhor visualização. O ciclo anual da LW é periódico e a sazonalidade é resultante das variações astronômicas da radiação G em função do local e dia, e das variações climáticas. Os maiores valores de LW ocorreram no verão, período onde a radiação G, temperatura, nebulosidade, precipitação e umidade, são mais elevadas do ano. Os menores valores de LW ocorreram no inverno, onde as condições climáticas quanto à radiação G, temperatura, nebulosidade, precipitação e umidade são contrárias as do verão, menos elevadas no ano (Fig. 1).

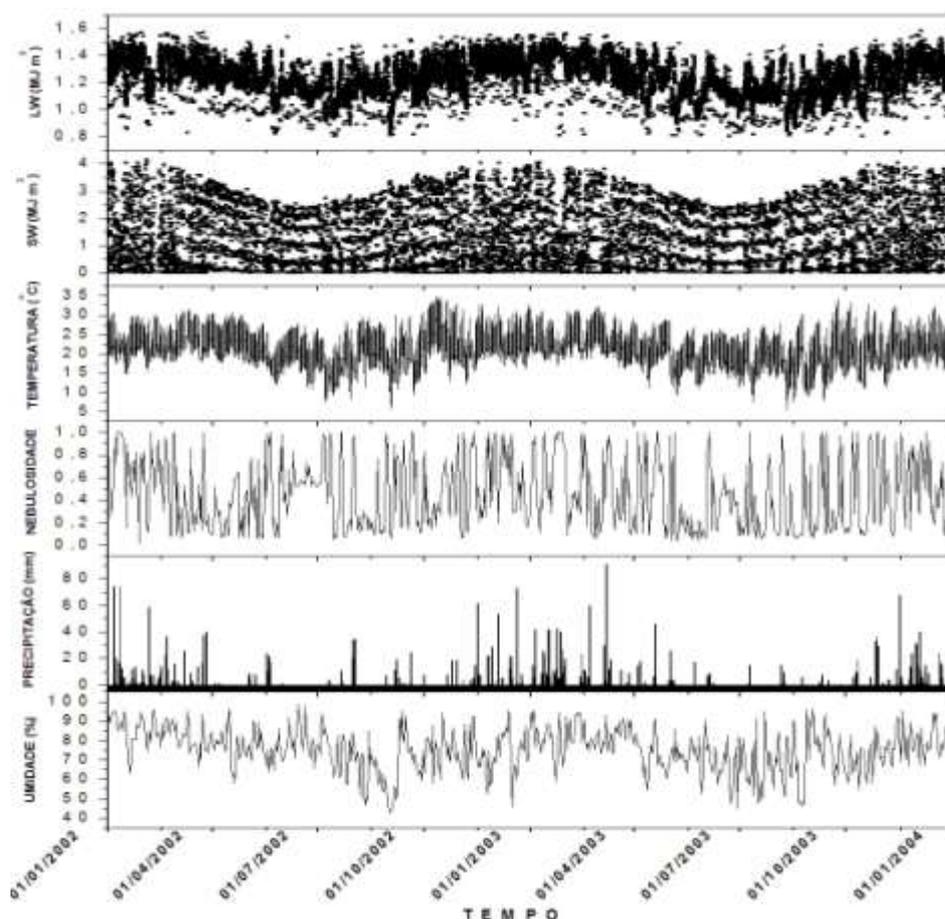


Figura 2 - Evoluções das radiações LW e G e os parâmetros climáticos do período de 2002 a 2003 .

A análise estatística das duas radiações LW e G para o período de 2000 a 2006 está representada na Tab. 1 e mostra o número de radiações horária, média, desvios e intervalo de variação para cada ano e no total dos 7 anos. O número de radiação LW, medida no período diurno/noturno (24 horas), é quase que o dobro do número de radiação G, medida no período diurno.

Tabela 1. Estatística das radiações LW e G horária de 2000 a 2006.

Radiação	Ano	Horas	Média (MJ m ⁻²)	SD	SD(%)	Min (MJ m ⁻²)	Max (MJ m ⁻²)	Variação (MJ m ⁻²)
LW	2000	8688	1,24	0,14	11,5	0,81	1,58	0,77
LW	2001	8636	1,25	0,14	10,9	0,81	1,56	0,75
LW	2002	8494	1,25	0,13	10,6	0,80	1,57	0,77
LW	2003	8587	1,23	0,15	11,9	0,80	1,58	0,78
LW	2004	8581	1,23	0,14	11,5	0,80	1,55	0,75
LW	2005	8655	1,24	0,13	10,8	0,80	1,58	0,77
LW	2006	8745	1,23	0,15	11,8	0,81	1,58	0,77
LW	Total	60386	1,24	0,14	11,3	0,80	1,58	0,78
G	2000	4744	1,39	1,13	81,4	0,00	4,14	4,14
G	2001	4695	1,43	1,13	79,2	0,00	4,13	4,13
G	2002	4593	1,39	1,09	79,0	0,00	4,15	4,15
G	2003	4690	1,39	1,10	79,3	0,00	4,05	4,05
G	2004	4648	1,34	1,09	81,3	0,00	4,12	4,12
G	2005	4672	1,34	1,07	79,8	0,00	4,00	4,00
G	2006	4685	1,39	1,06	76,5	0,00	4,04	4,04
G	Total	32727	1,38	1,10	79,6	0,00	4,15	4,15

A variação entre o valor máximo e mínimo médio, representado na Tab. 1 expressa a amplitude de variação das radiações LW e G médio em cada ano e no total dos 7 anos. A amplitude de variação da radiação de onda longa LW possui uma característica diferente da radiação de onda curta SW, os valores mínimos de LW em função da atmosfera não atingem o valor zero, a exemplo da radiação SW que atinge o zero na condição da ausência total da luz solar durante o dia ou no período noturno. Os valores médios mínimos e máximos de LW foram praticamente iguais em todos os anos, 0.80MJ/m² e 1.58MJ/m², respectivamente. O valor máximo de G foi também praticamente igual entre os anos, com média geral de 4.15MJ/m²

Os valores médios de LW e G não variam muito de um ano a outro. A LW variou de 1.23MJ/m² (2003) a 1.25MJ/m² (2001) com valor médio geral de 1.24MJ/m², enquanto que a G variou de 1.34MJ/m² (2004) a 1.43MJ/m² (2001) com valor médio geral de 1.38MJ/m²

O desvio da média de LW e G mostrado nas colunas 5 e 6 expressam a variabilidade das radiações ao longo do ano. O valor médio do desvio de LW e G mostram que não há uma variação muito grande de um ano a outro. No entanto, uma comparação na ordem de grandeza dos desvios de LW e G mostra que a radiação de onda curta sofre muito mais os efeitos da cobertura de céu que a de ondas longas. A LW variou de 10.6% (2002) a 11.8% (2006) com valor médio geral de 11.3%, enquanto que a radiação G variou de 76.6% (2006) a 81.4% (2000) com valor médio geral de 79.6%.

3.2 Correlação Anual de LW e G

A Fig. 3 mostra a correlação dos valores horários de LW em função do índice de claridade horário Kt. A distribuição dos pontos experimentais mostra que a radiação LW varia no sentido vertical e horizontal em função de Kt: Na vertical, a radiação LW possui um largo intervalo de variação para cada intervalo infinitesimal de Kt. No trabalho optou-se em utilizar na correlação a radiação LW média para cada intervalo centesimal Kt. Esta técnica foi utilizada por diversos pesquisadores, para facilitar ajustes de uma função simples e visualizar as tendências das frações solares difusa K_d e direta K_D, com intervalos centesimais de Kt (Orgill & Hollands, 1977; Erbs et al., 1982; Bartoli et al., 1982).

Na variação horizontal, os valores da radiação LW decrescem lentamente no sentido em que Kt aumenta, ou seja, LW decresce quando as concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera decrescem, em função da mudança de cobertura do céu no sentido do céu nebuloso, parcialmente nublado e aberto. As nuvens, pressão de vapor, e o índice de claridade guardam entre si uma forte correlação inversa: quanto menor a concentração de nuvens e vapor d'água, menor é a absorção da radiação infravermelha, e por consequência, maior a radiação global e o índice de claridade.

A variação vertical de LW, para mesmos valores de Kt, expressa quantitativamente como os efeitos das nuvens e vapor d'água na atmosfera influenciam nos valores de LW. A comparação entre os valores de LW no período onde a atmosfera é úmida e nebulosa (janeiro) e o período onde a atmosfera é seca e sem nuvens (agosto), em todo intervalo de Kt, mostra que os valores de LW são mais elevados na condição de atmosfera mais úmida e nebulosa no mês de janeiro, que na condição de baixa umidade e nebulosidade em agosto.

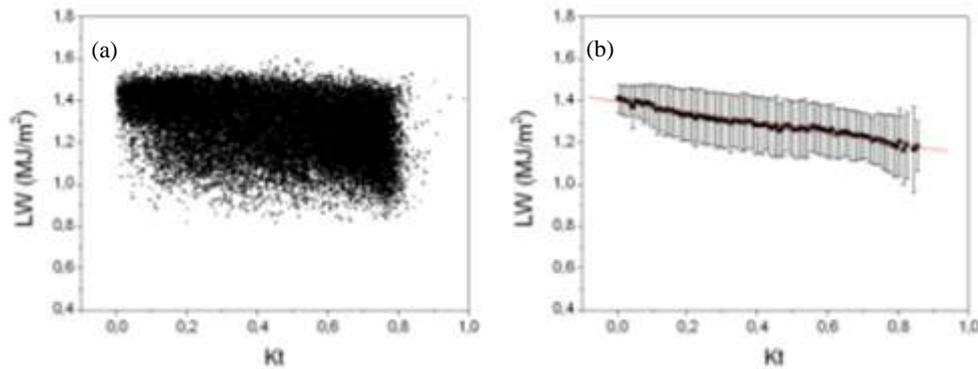


Figura 3 a) - Correlação dos valores LW horários em função do índice de claridade horário Kt;
 b) - Correlação dos valores LW horários médios em função do índice de claridade centesimal Kt.

O intervalo de variação de LW para mesmos valores de Kt na atmosfera mais úmida e nebulosa (janeiro) é menor que para a atmosfera seca e sem nuvens (agosto).

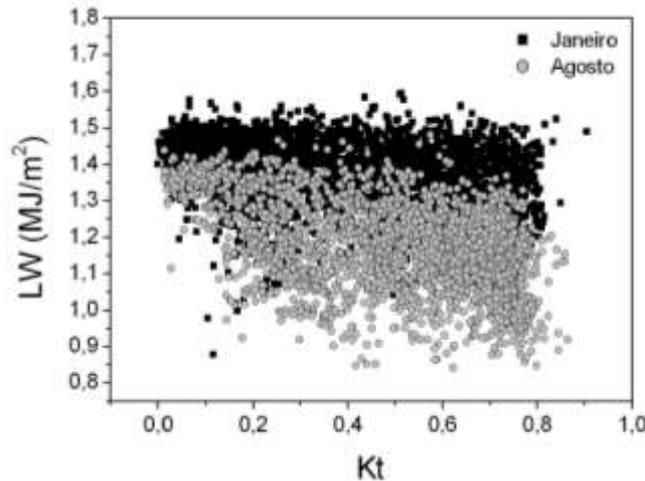


Figura 4 - Relação da LW em função de Kt na atmosfera mais úmida e nebulosa (janeiro) é menor que para a atmosfera seca e sem nuvens (agosto).

A equação linear (2) obtida entre a radiação média de LW e índice de claridade Kt centesimal por meio de regressão linear, com coeficiente de determinação $R^2 = 0.9707$ próximo de 1, mostra que LW e Kt estão muito bem correlacionadas.

$$LW = 1,40 - 0,252Kt \quad (2)$$

Como o termo **Kt** é menor que 1, o produto de $-bKt$ representa em todo intervalo de Kt uma quantidade muito inferior ao fator de intercepto **a** da equação (2). O fator de intercepto **a** da equação representa o valor máximo da radiação LW e é a contribuição da atmosfera do período noturno, enquanto que termo **b** expressa a taxa de decréscimo da LW em função da variação da cobertura de céu desde nebuloso e úmido (Kt tendendo a zero) até atmosfera sem nuvens e seco (Kt tendendo a 1).

No geral, para o intervalo de variação total de Kt=0 na cobertura céu sem luz solar até Kt = 0.8 na cobertura de céu aberto, o valor estimado de LW pode variar no intervalo entre 1.4 MJ m^{-2} ao valor de 1.198 MJ m^{-2} .

3.3 Correlação Sazonal entre LW e G

Como a atmosfera diurna e noturna pode variar consideravelmente em função das variações da radiação de ondas curtas e do clima local, em termos da nebulosidade, temperatura e umidade, foi necessário uma análise sazonal das radiações devido às variações da radiação de ondas curtas e do clima local, LW e G.

O agrupamento total dos dados foi dividido em 4 grupos separados por estação do ano em verão, outono, primavera e inverno, e as equações lineares foram obtidas entre a radiação média de LW e índice de claridade Kt centesimal (Fig. 3b). As equações e seus respectivos coeficientes de determinação estão na Tab. 2.

Tabela 2. Equações de Estimativa Sazonais para LW em função de Kt

Estação do Ano	Equações de Estimativa	R ²
verão	$LW = 1,425 - 0,300Kt$	0,8244
outono	$LW = 1,374 - 0,272Kt$	0,8705
inverno	$LW = 1,360 - 0,324Kt$	0,9029
primavera	$LW = 1,410 - 0,206Kt$	0,8935

As equações lineares da tabela 2 mostram que valor máximo de LW representado pelo fator de intercepto **a** nas equações é maior na sequência das estações verão, primavera, outono e inverno. O valor máximo de LW da equação linear total é inferior ao valor máximo de LW das equações lineares da primavera e verão, e superior aos das equações do outono e inverno. Os resultados indicam que a estimativa LW pela equação geral 2 tende a subestimar a LW nas estações da primavera e verão, e superestimar no outono e no inverno. Os resultados se justificam porque nas estações do verão e primavera, período úmido, a temperatura média, umidade e nebulosidade foram superiores aos valores das estações do inverno e outono do período seco. A temperatura média e a umidade decresceram na mesma sequência do fator de intercepto das equações sazonais: verão com 22,7 °C e 81,1%; primavera com 21,5 °C, e 76,2%; outono com 20,2 °C e 76,0% e inverno com 18,6 °C e 71,5%, respectivamente.

Similarmente, a nebulosidade decresceu na mesma sequência: verão com 52,6%; primavera 51,6%; outono 39,3% e inverno com 35,5%. A frequência de ocorrência de horas de céu nublado foi maior na sequência para o verão com 41,1%, primavera 38,1%, outono 27,6% e inverno 27,3%, enquanto que, a ocorrência de horas de céu aberto foi maior, na sequência, para o inverno com 35,9%, outono 35,2%, primavera 25,5% e verão 24,4%.

A profundidade ótica de aerossóis (AOD) mais elevada nas estações no inverno e primavera AOD= 19,2% e AOD=20,2% e menos elevadas no outono com AOD = 9,0% e verão AOD= 13,5% mostram não haver evidências que concentrações de aerossóis influenciaram nos valores de LW (Fig. 1).

3.3 Correlação Mensal de LW e G.

Similarmente à variação sazonal por estações do ano, a atmosfera diurna e noturna varia consideravelmente mês a mês, devido às variações astronômicas da radiação de onda curta e do clima local em termos da nebulosidade, temperatura, vapor d'água e vento. Portanto, uma análise mensal das variações da radiação de ondas curtas e do clima local, LW e G é importante porque expressa uma relação das duas radiações mais pontuais da atmosfera.

O agrupamento total dos dados das duas radiações foi dividido em 12 grupos, separados por meses do ano. As equações lineares foram obtidas entre a radiação média de LW e índice de claridade Kt centesimal. As equações e seus respectivos coeficientes de determinação estão na Tab. 3.

As equações lineares da Tab. 3 mostram que o valor máximo de LW representado pelo fator de intercepto **a** nas equações decresce na seqüência dos meses de janeiro a junho, e cresce de julho a dezembro. O valor máximo de LW da equação linear total é inferior ao valor máximo de LW das equações lineares dos meses do período chuvoso: janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro, e superior aos das equações dos meses do período seco: maio, junho, julho, agosto e setembro.

Tabela 3. Equações de Estimativa mensal para LW em função de Kt

Mês	LW = a + b Kt		
	a	b	R ²
Janeiro	1,44302	-0,15041	0,8932
Fevereiro	1,4292	-0,1439	0,6754
Março	1,43685	-0,17404	0,7954
Abril	1,43141	-0,28877	0,8827
Mai	1,37604	-0,36321	0,9100
Junho	1,30158	-0,24507	0,7914
Julho	1,36543	-0,39448	0,9301
Agosto	1,35616	-0,33835	0,8839
Setembro	1,37809	-0,29512	0,8863
Outubro	1,39681	-0,21443	0,8685
Novembro	1,42689	-0,23071	0,9050
Dezembro	1,44131	-0,18909	0,8419
Anual	1,40	-0,252	0,9707

Uma exceção nesta classificação ocorreu no mês de abril, início do período seco, o qual apresentou um valor máximo de LW similar a dos meses anteriores ao período chuvoso. O valor máximo de LW no mês de junho foi muito abaixo ao dos meses anterior e posterior, não seguindo a evolução típica climática da nebulosidade e vapor d'água na atmosfera.

Os resultados indicam que a estimativa LW pela equação geral (2) tende a subestimar a radiação LW nas estações da primavera e verão, e superestimar no outono e no inverno.

A evolução mensal do valor máximo de LW é compatível com os dois períodos úmido e seco. No período úmido, os meses apresentam temperatura média, umidade média e nebulosidade acumulada média, superiores aos valores dos meses do período seco. Os resultados indicam que a estimativa LW pela equação geral (2) tende a subestimar a radiação LW nos meses do período úmido (janeiro, fevereiro, março, outubro, novembro e dezembro) e superestimar no período da seca (abril, maio, julho, agosto e setembro).

A profundidade ótica de aerossóis (AOD) mais elevada nos meses de agosto, setembro e outubro (Fig. 1) mostra não haver evidências que concentrações de aerossóis influenciaram nos valores de LW da Tab. 3.

4. Validação do Modelo Linear Anual, Sazonal e Mensal.

Para a validação dos modelos (total, sazonal e mensal) as radiações médias horárias LW estimadas pelo modelo experimental (média e desvio) foram comparadas com a medida LW do ano de 2006. As Figs. 5, 6 e 7 mostram que a grande maioria das medidas de 2006 estão enquadradas na previsão dos modelos experimentais total, sazonal e mensal (média e desvio) e uma menor quantidade medidas posicionada externamente à estimativa do modelo.

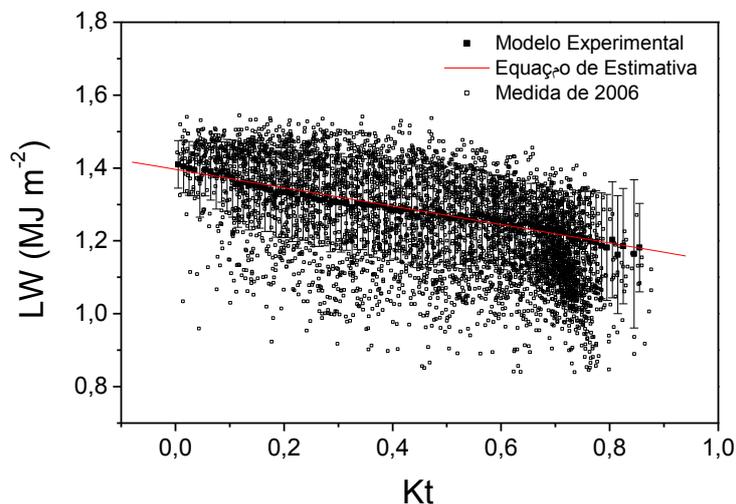


Figura 5 - Comparação das radiações médias horárias LW estimadas pelo modelo experimental anual (média e desvio) e a medida LW do ano de 2006.

Para o modelo total 70.0% da medida está em concordância com a previsão do modelo, e 30% não estão na região prevista no modelo. Para o modelo sazonal, a percentagem prevista na estimativa do modelo não foi igual para as quatro estações: o melhor resultado foi obtido para o verão com 76.0% de acerto, seguido das estações primavera e inverno com 69.0%, e o resultado menos favorável, no outono, com 59.0%. O melhor resultado no desempenho do modelo sazonal no verão pode estar associado à maior homogeneidade da atmosfera, quanto às concentrações de nuvens e vapor d'água, nas estações do ano. No verão, a atmosfera é mais uniforme que as demais estações, em função do maior número de dias nebulosos e úmidos, e emite LW também, com maior uniformidade ao longo dos dias neste período. Para o modelo mensal, a previsão na estimativa do modelo não foi igual também para os meses, os melhores resultados foram obtidos para os meses chuvosos, maiores concentrações de nuvens e vapor d'água na atmosfera, nas estações do verão e primavera, enquanto que os resultados menos favoráveis foram dos meses do período seco e sem nuvens, nas estações do outono e inverno. Como mencionado anteriormente, os melhores resultados no desempenho do modelo mensal esta associado à maior homogeneidade da atmosfera, quanto às concentrações de nuvens e vapor d'água, as quais emitem LW também com maior uniformidade ao longo dos dias neste período.

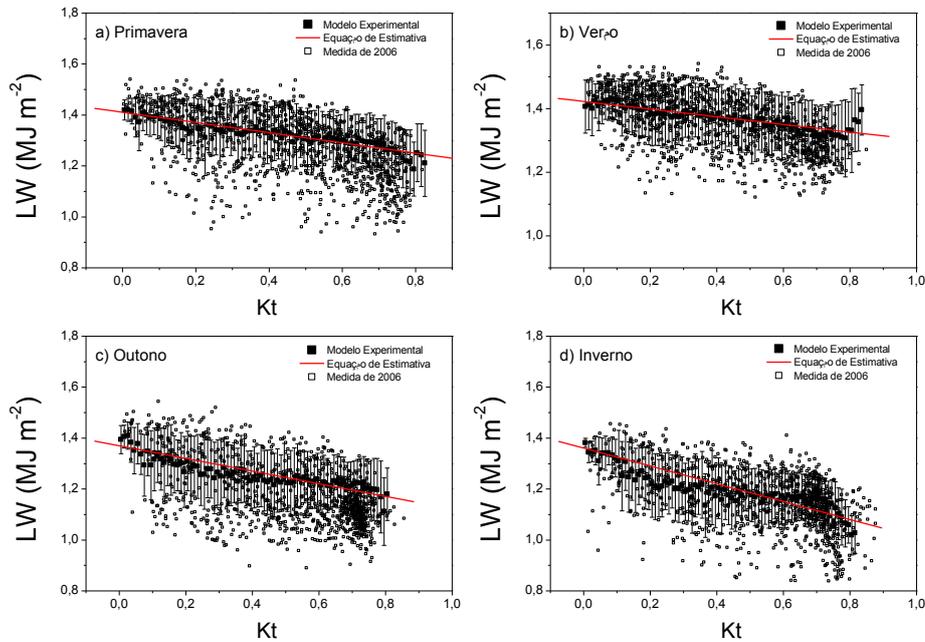


Figura 6 - Comparação das radiações médias horárias LW estimadas pelo modelo experimental sazonal (média e desvio) e a medida LW do ano de 2006.

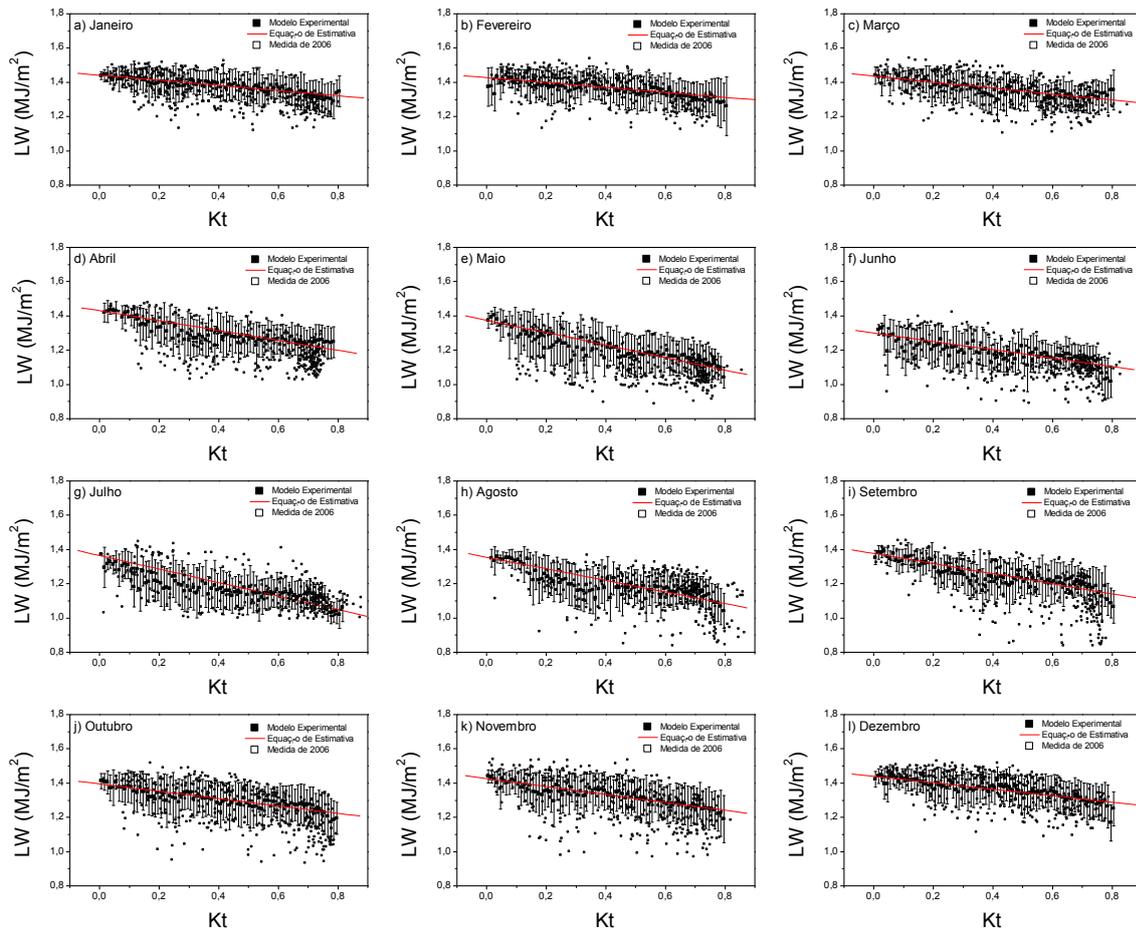


Figura 7 - Comparação das radiações médias horárias LW estimadas pelo modelo experimental mensal (média e desvio) e a medida LW do ano de 2006.

O modelo linear foi também validado comparando as radiações médias horárias LW estimadas pelo modelo estatístico (curva de regressão polinomial total e sazonal), e a medida LW do ano de 2006 por meio dos indicadores estatísticos MBE e RMSE, como mostrado nas Figs. 5, 6 e 7.

Tabela 4. Indicativos estatísticos MBE e RSME obtidos da comparação da LW estimada pelo modelo estatístico (curva de regressão polinomial mensal), e a medida LW mensal do ano de 2006.

Modelo	MBE(%)	RMSE(%)
Janeiro	2,4837	5,8082
Fevereiro	0,6859	5,2920
Março	1,2719	5,9639
Abril	5,2433	9,1097
Mai	5,8964	10,2689
Junho	4,2552	8,8949
Julho	0,2279	7,8592
Agosto	1,4351	9,3392
Setembro	3,8395	9,8428
Outubro	2,5068	8,8023
Novembro	2,3793	8,9760
Dezembro	0,3645	5,9436
Verão	1,1020	5,6619
Outono	4,5814	10,2025
Inverno	2,7897	9,4112
Primavera	2,2992	8,7844
Anual	2,50455	9,9391

Para o modelo total, os valores obtidos para MBE e RMSE foram de 2.5% e 9.9%, respectivamente. O resultado de 2.5% para o MBE foi considerado positivo estatisticamente, pois o modelo superestimou a medida da radiação LW com erro da ordem de grandeza da imprecisão do equipamento de medida de LW. O valor de aproximadamente 10.0% para o espalhamento da média corrobora com os resultados obtidos para os desvios da média da equação geral e no valor médio de LW nas estatísticas mostradas na Tab. 1.

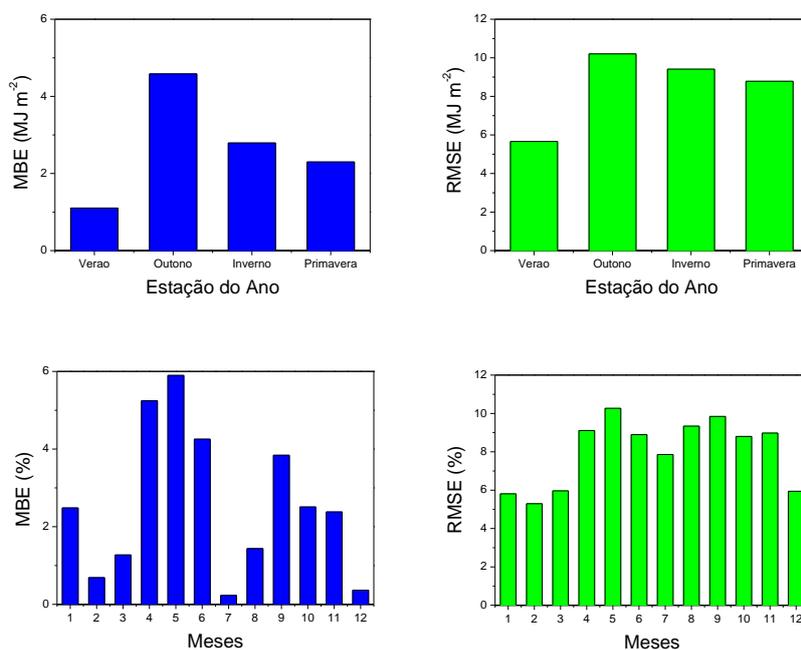


Figura 8 - Indicativos estatísticos MBE e RMSE obtidos da comparação entre as radiações médias horárias LW estimadas pelo modelo estatístico (curva de regressão polinomial total, sazonal e mensal) e a medida LW do ano de 2006

Na validação sazonal, os indicativos MBE e RMSE variaram a cada estação do ano. Os valores de MBE superestimando a medida de LW variaram de 1,1% no verão até 4,6% no outono. Similarmente, no inverno e na primavera, o modelo superestimou a medida com percentuais de 2,8% e 2,3%, respectivamente. Os valores de RMSE variaram de 5,7% no verão até 10,2% no outono. No inverno e na primavera, os valores de RMSE foram de 8,8% e 9,9%, respectivamente.

Similarmente, na validação mensal, os indicativos MBE e RMSE variaram a cada mês do ano. Os valores de MBE variaram de 0,2% em julho até 3,8% em setembro. Os valores de RMSE variaram de 5,2% no mês de fevereiro até 10,3% em maio. No geral os valores de MBE e RMSE da validação mensais foram de melhores estatisticamente no período em que atmosfera é mais nebulosa e com mais valor de água no ano.

4. CONCLUSÕES

A evolução temporal das radiações LW e G comprovou que a radiação de onda longa depende da radiação global, e conseqüentemente, das variações dos parâmetros meteorológicos: temperatura, nebulosidade e vapor d'água. Os maiores valores de LW ocorreram no verão, período onde G, temperatura, nebulosidade, precipitação e umidade são mais elevadas do ano, e os menores valores de LW ocorreram no inverno, onde as condições climáticas são contrárias ao verão. A correlação anual, sazonal e mensal entre LW e Kt é tipo linear: $LW = a - bKt$ com coeficientes de determinação mais elevados, em seqüência, para equação anual, sazonal e mensal. O fator de intercepto da equação (reta) é o valor máximo da estimativa da radiação LW e representa a contribuição da atmosfera do período noturno, enquanto que o termo *b* expressa a taxa de decréscimo da LW em função da variação da cobertura de céu desde nebuloso e úmido ($Kt < 0.35$) até sem nuvens e seca ($Kt > 0.65$). O modelo foi validado por dois processos: no primeiro, as radiações horárias LW estimadas pelo modelo experimental (média e desvio) foram comparadas com a medida LW do ano de 2006, e os resultados foram melhores, em seqüência, para o modelo anual, sazonal e mensal. O modelo linear foi também validado, comparando-se as radiações médias horárias LW estimadas pelo modelo estatístico (curva de regressão polinomial anual, sazonal e mensal), e a medida LW do ano de 2006, por meio dos indicativos estatísticos MBE e RMSE, e os resultados foram melhores, em seqüência, para o modelo anual, sazonal e mensal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Ångström, A., 1918. A study of the radiation of the atmosphere. *Smithson. Misc. Collect.* v. 65, p. 1-159.
- Bartoli, B., Cuomo, V., Amato, U., 1982. Diffuse and beam components of daily global radiation in Genova and Macerata. *Solar Energy*, v.28, p.307-11.
- 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.; Dal Pai, A., 2008. Global and diffuse solar irradiances in urban and rural áreas in Southeast Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, v.93, n.1, p.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
- Erbs, D.G., Klein, S.A., Duffie, J.A., 1982. Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation. *sol. energy*, v.28, p.293-302, 1982.
- 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.
- Ineichen, P., Gremaud, J. M., Guisan O., Mermoud, A., 1984. Infrared radiation in Geneva. *Solar Energy*. v. 32, p. 537-545.
- Niemelä, S., Räisänen, P., Savijärvi, H., 2001. Comparison of surface radiative flux parameterization part i: longwave radiation, *atmos. Res.* V. 58, P. 1-18.
- Orgill, J. F., Hollands, K. G. T., 1977. Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface. *Solar Energy*, v.19, n.3, p.357-359.
- 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.
- Sridhar, V., Elliott, R.L., 2002. On the development of a simple downwelling longwave radiation scheme. *Agric. For. Meteorol.* v. 112, p. 237-243.
- Swinbank, W.C., 1963. Long-wave radiation from clear skies. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 110, P. 339-348.
- Udo, S.O., 1999. On the relationship between downward infrared sky radiation and clearness index. *Global Journal of Pure and Applied Science.* v. 5, n. 3, p. 427-430.

ESTIMATION EQUATION OF THE ATMOSPHERIC RADIATION AS A FUNCTION OF THE CLEARNESS INDEX K_t IN BOTUCATU/SP/BRAZIL

Abstract. This paper presents a statistical and climate analysis of atmospheric longwave radiation (LW) and shortwave global radiation (G), measured in the period from 2000 to 2006 in Botucatu / SP / Brazil. It also describes the generation and validation of a model to estimate annual, seasonal and monthly values of LW as a function of G, using the clearness index K_t (G / H_0 , where H_0 is the extraterrestrial radiation). The LW variation range was proportional to the seasonal variation of global radiation and climate elements: temperature, nebulosity and water vapor in the atmosphere. The highest values of LW occurred in the summer, wet season, where G and climate elements are higher in the year. The lowest values of LW occurred in winter. Annual, seasonal and monthly estimation model of LW obtained as a function of G was of a linear type: $LW = a - bK_t$, with high determination coefficient. The a intercept factor of the equation represents the maximum value of LW radiation, emission from the atmosphere at night, while b expresses the rate of decline of LW due to the variation in the sky coverage from cloudy to cloudless. Model validation was performed by comparing LW estimated and measured (year of 2006) using the statistical indicators MBE and RMSE. For annual model, MBE and RMSE values were 2.5% and 9.9%, respectively. For the seasonal model, MBE values were: Summer -4.0%, Autumn 4.6%, Winter 2.8% and Spring 2.3%, while RMSE values were 6.7% in Summer, 10.2% in Autumn, 8.8% in Winter and 9.4% in Spring, and for the monthly model MBE values ranged from 0.2% in July to 3.8% in September, and RMSE values ranged from 5.2% in February to 10.3% in May.

Key words: longwave radiation, downward atmospheric longwave radiation.